

**В. И. ДЕНИСЕНКО  
В. Н. КИЧИГИН  
М. В. КЫЧАНОВ**

# **ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ УСИЛИТЕЛИ**

Учебно-методическое пособие



Министерство образования и науки Российской Федерации  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

В. И. Денисенко, В. Н. Кичигин, М. В. Кычанов

# **ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ УСИЛИТЕЛИ**

---

Учебно-методическое пособие

*Под общей редакцией доктора технических наук,  
профессора В. И. Денисенко*

Рекомендовано методическим советом  
Уральского федерального университета  
для студентов вуза, обучающихся по направлению  
13.03.02 — Электроэнергетика и электротехника,  
профиль «Электромеханика»

*3-е издание, исправленное*

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2017

УДК 621.375.6(075.8)

ББК 31.26я73

Д33

Рецензенты: *Кавалеров Б. В.*, д-р техн. наук завкафедрой «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета; *Шулаков Н. В.*, д-р техн. наук, проф., заслуженный работник Высшей школы, лауреат премии Правительства РФ; *Смолин Г. К.*, д-р техн. наук, проф. Российского государственного профессионально-педагогического университета

**Денисенко, В. И.**

Д33 Электромашинные усилители : учебно-методическое пособие / В. И. Денисенко, В. Н. Кичигин, М. В. Кычанов ; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В. И. Денисенко. — 3-е изд., испр. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 60 с.  
ISBN 978-5-7996-2174-2

В пособии отражены общие теоретические сведения об электромашинных усилителях (ЭМУ), области их применения, особенности конструкции.

Содержится подробное описание ЭМУ с поперечным полем как наиболее распространенного типа электромашинного усилителя, приведены его статические и динамические характеристики.

Даны общие указания и рекомендации для исследования электромашинного усилителя поперечного поля, подробные указания и советы по обработке и анализу опытных данных.

Работа предназначена для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 — Электроэнергетика и электротехника, профиль «Электромеханика» (бакалавриат). Может быть использована при обучении студентов профиля «Общая теория электромеханического преобразования энергии» (магистратура).

Библиогр.: 5 назв. Рис. 23. Табл. 10. Прил. 1.

Подготовлено кафедрой «Электрические машины» УралЭНИН.

УДК 621.375.6(075.8)

ББК 31.26я73

ISBN 978-5-7996-2174-2

© УГТУ—УПИ, 2008

© Уральский федеральный университет, 2011, с изменениями

© Уральский федеральный университет, 2017, 3-е изд., испр.

# 1. Основы теории электромашинных усилителей

---

## *1.1. Общие сведения и примеры использования электромашинных усилителей*

---

Электромашинный усилитель (ЭМУ) — это специальный генератор постоянного тока с большим соотношением между выходной мощностью и входным сигналом, подаваемым в цепь возбуждения. В усилителе посредством системы малой мощности управляют сравнительно большой мощностью (выходная величина). При этом выходная величина является функцией входного сигнала и усиление происходит за счет энергии внешнего источника. В электромашинных усилителях выходная (управляемая) мощность создается за счет механической мощности приводного двигателя.

Электромашинные усилители выпускаются серийно и нашли широкое применение в системах автоматического регулирования и автоматизированного электропривода. Широкое применение ЭМУ обусловлено не только их большим коэффициентом усиления и достаточно высоким быстродействием по сравнению с другими видами усилителей, но и способностью изменять полярность напряжения на выходе при изменении полярности на входе, а также высокой перегрузочной способностью. ЭМУ используется для возбуждения более мощных генераторов, а также в системах генератор — двигатель, где генератор, а часто еще и возбудитель представляют собой независимые электромашинные усилители, соединенные в каскад.

В системах автоматики используются одноступенчатые ЭМУ, каскад ЭМУ, а также двухступенчатые электромашинные усилители. В качестве одноступенчатого ЭМУ может быть использован обычный генератор постоянного тока с независимым возбуждением. Каскад ЭМУ представляет собой два или несколько последовательно соединенных ЭМУ. Широко применяются двухступенчатые ЭМУ поперечного поля.

ЭМУ применяют как в разомкнутых, так и в замкнутых системах автоматического регулирования, в которых для улучшения характеристик используются обратные связи по току и напряжению. Система ЭМУ — генератор используется для автоматического регулирования напряжения генератора; система ЭМУ — двигатель — для автоматического регулирования частоты вращения двигателя, где ЭМУ применяются как в качестве возбудителей генератора, так и в качестве самих генераторов. Следящая система с ЭМУ используется в качестве усилителя мощности.

С внедрением достаточно мощных электронных усилителей применение ЭМУ в системе генератор — двигатель значительно сокращается. Однако ЭМУ до сих пор находят применение в системах ЭМУ — двигатель, где электромашинный усилитель используется в качестве генератора, питающего двигатель. В последние годы в результате использования промежуточных полупроводниковых усилителей значительно увеличился диапазон регулирования и быстродействие электроприводов, работающих на системах ЭМУ — двигатель. Такие электроприводы применяются в различных областях. Электроприводы с использованием ЭМУ мощностью до 10 кВт получили в настоящее время распространение в станках и установках радиоэлектронной промышленности. Рассмотрим несколько примеров использования электромашинных усилителей в схемах автоматики.

На рис. 1.1 приведена схема бесконтактной системы автоматического регулирования амплитуды синусоидального напряжения. Эта схема применяется на радиозаводах, на участках настройки телевизоров и радиоприемников, где напряжение должно быть стабилизировано по амплитуде и синусоидально изменяться по времени. Применение феррорезонансных стабилизаторов для этих целей недопустимо, так как, поддерживая с достаточной точностью амплитуду, феррорезонансные стабилизаторы сильно искажают синусоиду. Поэтому в таких случаях применяют системы автоматической стабилизации напряжения с использованием в качестве регулирующего органа индукционного регулятора.

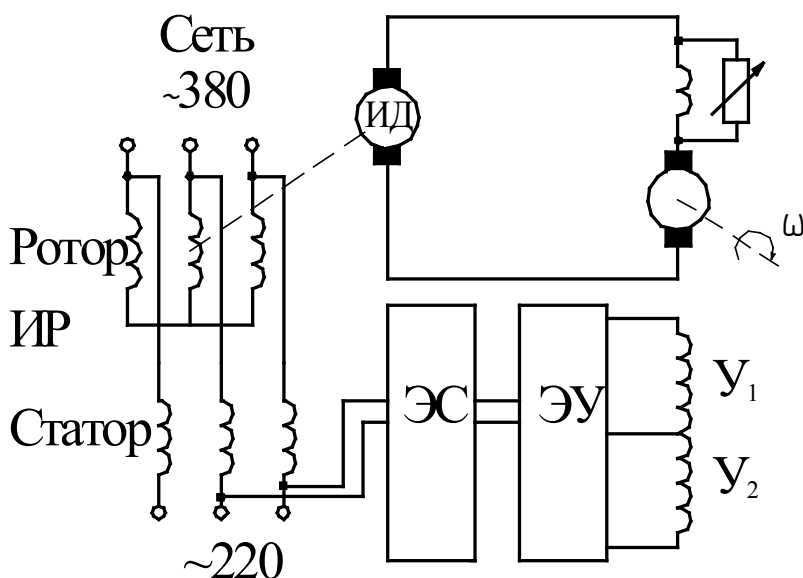


Рис. 1.1. Схема бесконтактной системы автоматического регулирования амплитуды синусоидального напряжения

В схеме на рис. 1.1 нестабильное трехфазное напряжение подается на ротор индукционного регулятора ИР. Выходное стабилизируемое напряжение снимается с зажимов статора, подается на приемники и одновременно на вход элемента сравнения, где сравнивается с опорным эталонным напряжением. Сигнал рассогласования усиливается электронным усилителем ЭУ и поступает на одну из обмоток управления электромашинного усилителя —  $U_1$  или  $U_2$ . В зависимости от полярности сигнала рассогласования на выходе ЭМУ появляются напряжения прямой или обратной полярности и исполнительный двигатель ИД, вращаясь, перемещает ротор индукционного регулятора в сторону уменьшения или увеличения напряжения.

На рис. 1.2 представлена электрическая схема полуавтомата для спая стеклянного дна с металлическим конусом электронно-лучевых трубок. Вид спая в этом случае несогласованный, так как коэффициент линейного расширения материала конуса (хромистая сталь) и стекла неодинаковый. Поэтому для получения хорошего спая необходимо сначала произвести разогрев стекла. Эту операцию выполняет блок нагревателей БН, температура которого контролируется термопарой Т и автоматически поддерживается терморегулирующим прибором

ЭМР. Сваривание при рабочей температуре 1100–1200 °С производится токами высокой частоты, которые вырабатывает генератор повышенной частоты Г, питающий блок индукторов БИ. Для получения стабильного выходного напряжения генератора Г его цепь возбуждения питается от ЭМУ поперечного поля. В этой схеме ЭМУ играет роль усилителя мощности и элемента сравнения. На рис. 1.1 и рис. 1.2 приведены схемы использования электромашинных усилителей в системах радиоэлектронной промышленности. Аналогичных схем в различных автоматизированных системах, где в качестве усилителей мощности используются ЭМУ поперечного поля, довольно много. Применению ЭМУ в этих схемах способствует наличие нескольких обмоток управления, что позволяет сравнивать сигналы и вводить обратные связи. Высокий коэффициент усиления повышает быстродействие таких систем.

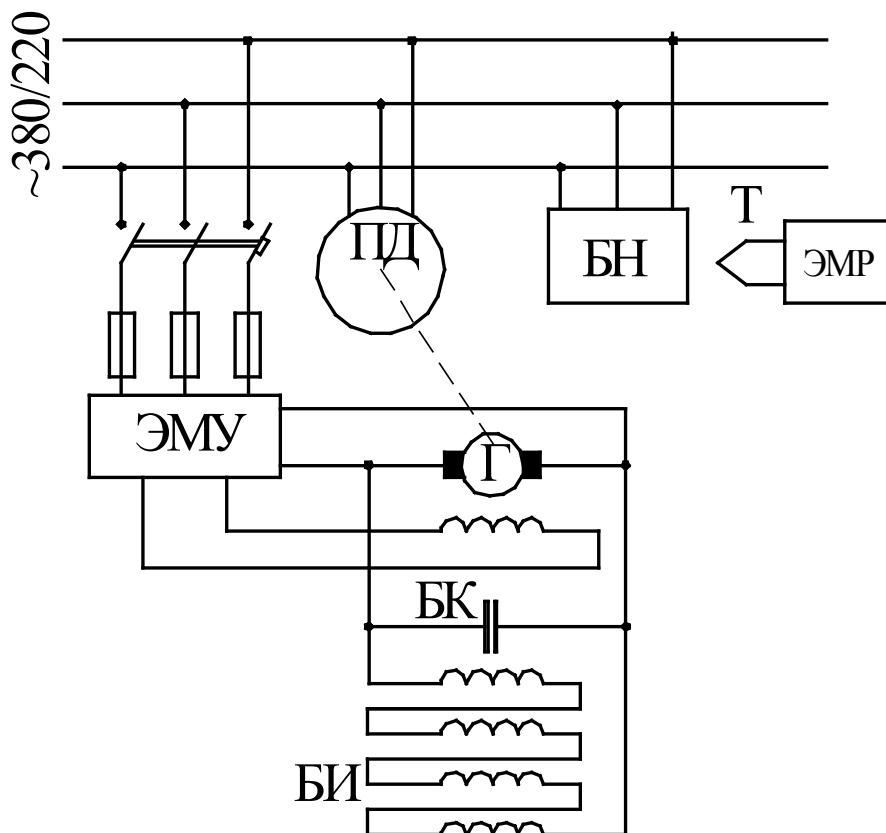


Рис. 1.2. Схема полуавтомата для спая стеклянного дна с металлическим конусом электронно-лучевых трубок



На рис. 1.3 показана схема привода антенны радиолокационной станции в режиме кругового вращения с постоянной угловой скоростью. Схема состоит из исполнительного двигателя постоянного тока ИД, приводящего во вращение антенну А, тахогенератора постоянного тока ТГ, механически связанного с валом ИД, и двух усилителей: электронного ЭУ и ЭМУ поперечного поля. При мощности исполнительного двигателя в несколько сотен ватт и более такая двухступенчатая схема усиления с ЭМУ поперечного поля может иметь лучшие технико-экономические характеристики, чем электронная. Задающим элементом является делитель напряжения ДН, питающийся от источника постоянного тока.

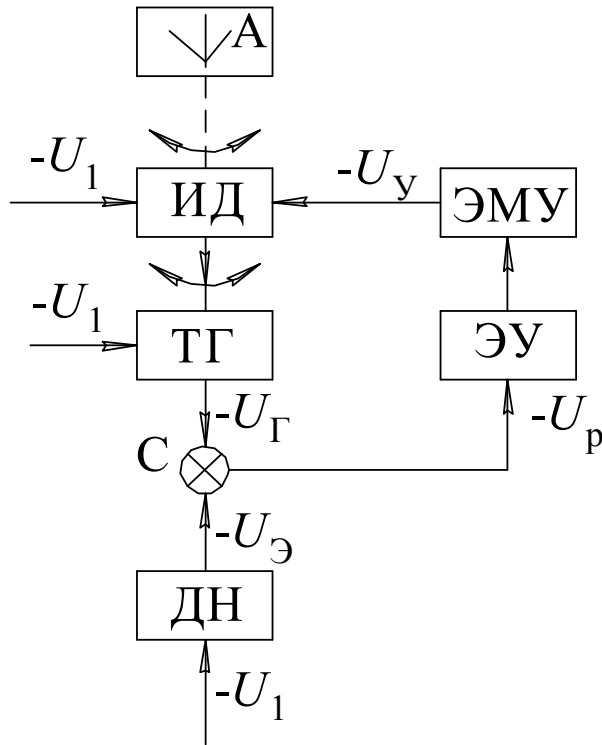


Рис. 1.3. Схема привода антенны радиолокационной станции

Привод работает следующим образом. Необходимая угловая скорость задается соответствующим значением эталонного напряжения  $U_3$ . Это напряжение через элемент сравнения поступает на вход усилителя ЭУ. После усиления в ЭУ и ЭМУ напряжение  $U_y$  подается

на обмотку управления исполнительного двигателя, обмотка возбуждения которого постоянно подключена к источнику напряжения  $U_1$ . Ротор двигателя начинает вращаться и поворачивать антенну А и ротор тахогенератора ТГ. Выходное напряжение тахогенератора  $U_r$  сравнивается в узле С с эталонным напряжением  $U_{\text{э}}$ , и на выходе усилительного каскада устанавливается постоянное значение  $U_y$ , определяемое напряжением рассогласования  $U_p$ . Ротор ИД и антенна непрерывно вращаются с постоянной угловой скоростью. Маломощные электромашинные усилители мощности (ЭМУ) в диапазоне мощностей от нескольких десятков до нескольких сотен ватт широко используются во многих отраслях техники, применяющих автоматические устройства для регулирования и управления различными исполнительными механизмами, производственными процессами и некоторыми специальными объектами. Посредством ЭМУ в этих устройствах управляют относительно большими мощностями с помощью малой подаваемой мощности в управляющие обмотки усилителя.

В схемах автоматических устройств применяется два типа ЭМУ: ЭМУ с поперечным полем и ЭМУ с продольным полем.

## 1.2. Генератор постоянного тока как электромашинный усилитель

В качестве простейшего ЭМУ можно рассматривать обычный генератор постоянного тока с независимым возбуждением (см. рис. 1.4). Обмотка возбуждения такого генератора является обмоткой управления, а цепь якоря — выходной цепью.

На рис. 1.5 представлена энергетическая диаграмма простейшего электромашинного ЭМУ, показывающая преобразование механической мощности  $P_1$ , получаемой с вала от приводного двигателя, в электрическую мощность

$$P_2 = I_a \cdot U_a.$$

В процессе преобразования потребляемая мощность расходуется на покрытие механических потерь (потери на трение, вентиляционные потери)  $P_{\text{мх}}$ , магнитных потерь (на гистерезис и вихревые токи)  $P_{\text{мг}}$ , добавочных потерь  $P_{\text{д}}$ . Полученная электромагнитная мощность

$P_{\text{ЭМ}}$  включает в себя электрические потери в обмотке якоря  $P_{\text{эл}}$  и полезную выходную мощность  $P_2$ . Так как в таких генераторах мощность возбуждения (мощность управления), как правило,

$$P_y = (0,01-0,02)P_H,$$

где  $P_H$  — номинальная мощность усиления, то коэффициент усиления простейшего ЭМУ

$$K_y = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{P_2}{P_y} = 50 \div 100, \quad (1.1)$$

где  $P_{\text{ВЫХ}}$  — выходная мощность (в цепи нагрузки);  $P_{\text{ВХ}}$  — входная мощность (мощность, подаваемая на обмотку напряжения).

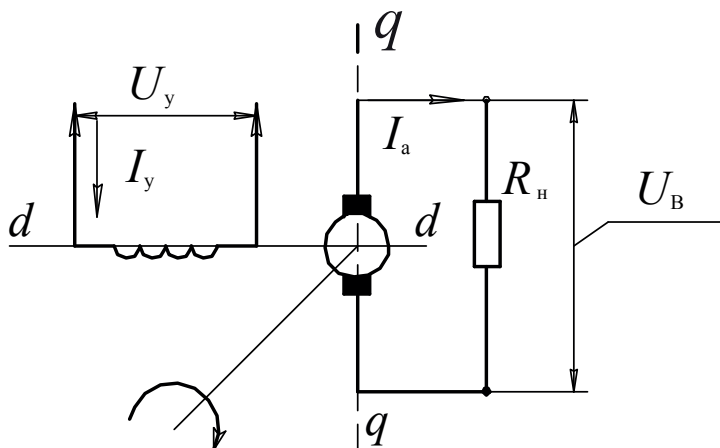


Рис. 1.4. ЭМУ как генератор постоянного тока с независимым возбуждением

Таким образом, электрическая мощность, поданная в обмотку управления (возбуждения), усилена в 50–100 раз за счет преобразования механической мощности в электрическую.

В зависимости от способа возбуждения ЭМУ подразделяются на усилители продольного поля (пример — простейший электромашинный усилитель), в котором поток возбуждения (управления) направлен по продольной оси машины, и ЭМУ поперечного поля, в которых основной поток возбуждения направлен по поперечной оси.

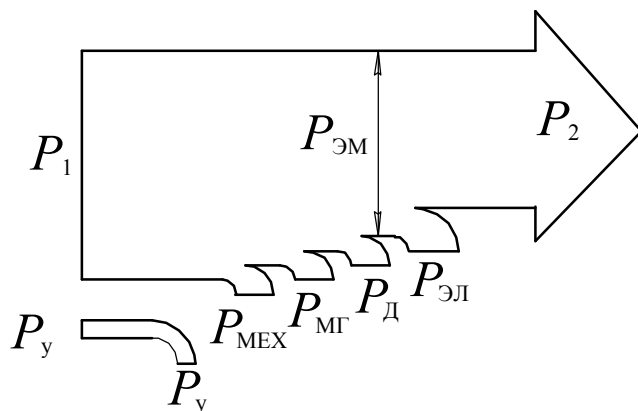


Рис. 1.5. Энергетическая диаграмма простейшего ЭМУ

### 1.3. Устройство и принцип действия ЭМУ с продольным полем

В некоторых автоматических устройствах иногда встречаются в качестве одного из элементов схемы маломощные одноступенчатые электромашинные усилители с продольным полем.

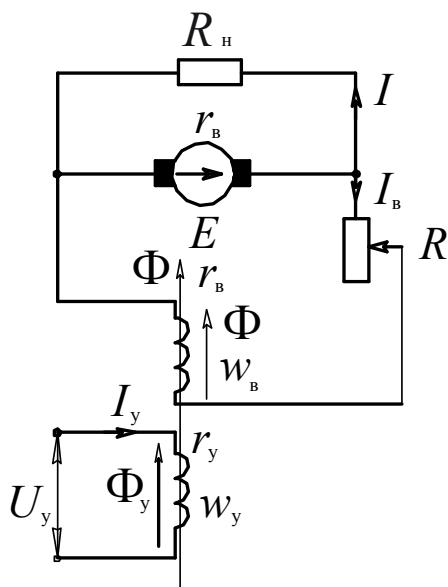


Рис. 1.6. Система одноступенчатого ЭМУ

Такой усилитель представляет собой маломощный генератор постоянного тока с параллельным возбуждением с критическим сопротивлением в этой цепи и дополнительной управляющей обмоткой независимого возбуждения, расположенной на полюсах вместе с параллельной обмоткой (см. рис. 1.6). В этом ЭМУ параллельная обмотка возбуждения ОВ является главной, создающей основной поток  $\Phi$ , а обмотка управления ОУ — вспомогательной, создающей поток управления  $\Phi_y$ . Оба этих потока совпадают с продольной осью полюсов машины, что и определяет ее название — ЭМУ с продольным полем.

Величина МДС  $AW_y$  управляющей обмотки в маломощных ЭМУ обычно составляет 5—10 % от общей МДС двух обмоток возбуждения ( $AW_y + AW_B$ ).

Общее омическое сопротивление цепи главной параллельной обмотки возбуждения ЭМУ ( $r_B + R$ ) выбирается равным или большим критического. Под критическим сопротивлением здесь понимается такое сопротивление, при котором линия падения напряжения в нем от тока возбуждения  $I_B$  ( $r_B + R$ ) =  $f(I_B)$  является касательной к характеристике холостого хода машины в начале координат (см. рис. 1.7). В связи с этим при отсутствии сигнала в обмотке управления машина не может самовозбудиться.

На рис. 1.7 представлены характеристика холостого хода и внешняя характеристика ЭМУ с продольным полем. Внешняя характеристика этого ЭМУ представляет собой графически изображенную зависимость выходного напряжения на зажимах от тока нагрузки при  $n = \text{const}$ ;  $(r_B + R) = \text{const}$  и  $I_y = \text{const}$ .

Для уменьшения влияния вихревых токов на процессы нарастания выходного напряжения при включении сигнала в управляющую обмотку и снижении остаточного магнетизма магнитная система этого ЭМУ должна выполняться шихтованной из листовой электротехнической стали. Вместе с тем для уменьшения остаточного магнетизма здесь необходимо воздушный зазор между якорем и полюсами выполнять несколько увеличенным.

Работа ЭМУ с продольным полем представляется в следующем виде. При включении сигнала в управляющую обмотку ЭМУ ее МДС  $AW_y = OA$  (рис. 1.7) создает на зажимах якоря ЭДС, равную отрезку  $Aa$ . Под влиянием этой ЭДС в цепи параллельной обмотки возбуждения возникнет ток и в машине начнется процесс самовозбуждения. Нарастающая МДС главной обмотки возбуждения  $AW_B$  будет складывать-

ся с постоянной МДС управляющей обмотки  $AW_y$ , в результате этого на зажимах якоря произойдет нарастание напряжения. Пока ЭДС якоря больше падения напряжения в сопротивлении цепи главной обмотки возбуждения  $E > I_B (r_B + R)$ , напряжение на зажимах якоря будет возрастать.

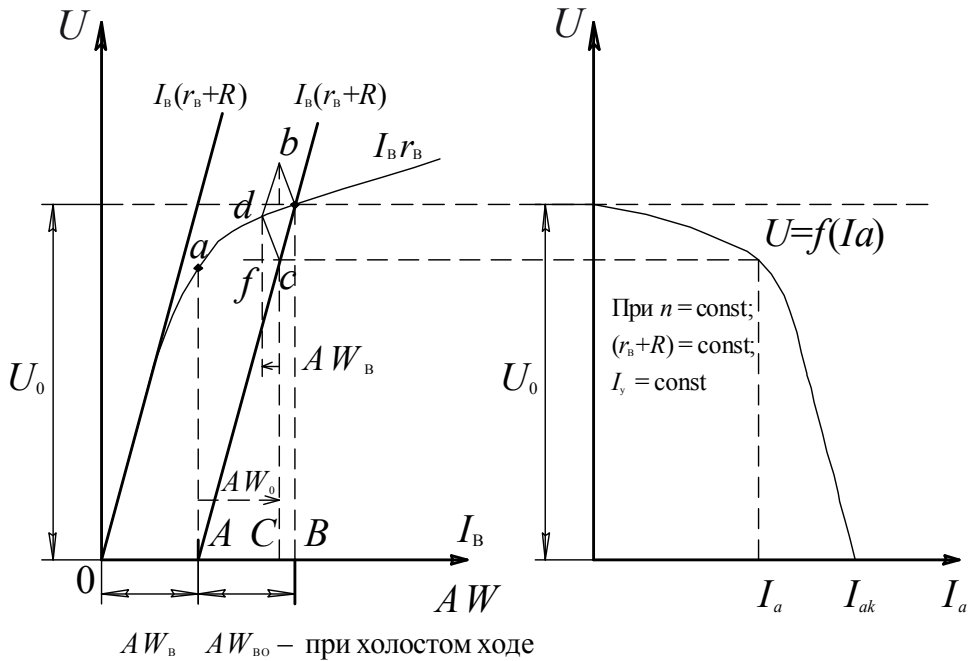


Рис. 1.7. Характеристика холостого хода и внешняя характеристика ЭМУ с продольным полем

Когда эта ЭДС будет равна указанному падению напряжения  $E = I_B (r_B + R)$ , процесс самовозбуждения машины закончится. Окончание этого процесса будет определяться точкой пересечения кривой характеристики холостого хода  $U = f(I_B)$  и прямой падения напряжения в сопротивлении цепи возбуждения  $I_B (r_B + R) = f(I_B)$  (рис. 1.7). Для нахождения этой точки на кривой  $U = f(I_B)$  следует линию  $I_B (r_B + R)$  перенести параллельно самой себе из точки  $O$  в точку  $A$ , так как МДС главной и управляющей обмоток складываются. После этого точка  $b$  на кривой характеристики холостого хода и будет отвечать окончанию процесса самовозбуждения ЭМУ (рис. 1.7). При этом ордината  $Bb$  будет равна выходному напряжению ЭМУ при холостом ходе, а абсцисса

$AB$  — току возбуждения в этом режиме. При включении нагрузки  $R$  в цепь якоря напряжение на зажимах его уменьшится под влиянием трех причин: падения напряжения в сопротивлении цепи якоря  $I_a r_a$ , размагничивающего действия реакции якоря  $AW_R$  и уменьшения тока возбуждения вследствие снижения напряжения под влиянием первых двух причин. На рис. 1.7 представлен характеристический треугольник  $cdf$ , вписанный между кривой и прямой и выражающий влияние на напряжение первых двух причин. В результате выходное напряжение ЭМУ при нагрузке будет определяться ординатой  $Cc$ , а ток возбуждения — абсциссой  $AC$ .

Если выключить ток управляющей обмотки ЭМУ, то точка  $A$  на рис. 1.7 передвинется вместе с линией падения напряжения в точку  $O$  и выходное напряжение машины исчезнет.

Коэффициент усиления по мощности ЭМУ с продольным полем

$$K_p = \frac{P}{P_y} = \frac{U \cdot I}{I_y^2 \cdot r_y}, \quad (1.2)$$

где  $U$  и  $I$  — соответственно выходное напряжение и отдаваемый ток ЭМУ;  $I_y$  — ток управляющей обмотки;  $r_y$  — омическое сопротивление данной обмотки.

Величина этого коэффициента в маломощных ЭМУ с продольным полем может достигать порядка 1000–2000 и выше.

#### 1.4. ЭМУ с самовозбуждением

Коэффициент усиления по мощности независимого ЭМУ не превышает 100. Для повышения коэффициента усиления по мощности ЭМУ были созданы электромашинные усилители с самовозбуждением. В 1942 г. фирма «Вестингауз» начала серийный выпуск этих усилителей под названием «рототрол».

Конструктивно ЭМУ с самовозбуждением (ЭМУС) отличается от независимого ЭМУ только тем, что на его полюсах возбуждения соосно с обмотками управления размещается обмотка самовозбуждения, включаемая параллельно обмотке якоря или последовательно с ней.

На рис. 1.8, *a* показано конструктивное расположение обмоток управления и самовозбуждения на полюсах статора ЭМУС; на рис. 1.8, *б*

представлена принципиальная схема ЭМУС с параллельным возбуждением, на рис. 1.8, *в* — с последовательным возбуждением.

Для пояснения принципа действия ЭМУС рассмотрим возбуждение генератора постоянного тока с параллельным возбуждением. На рис. 1.9, *а* изображены характеристика холостого хода машины  $E = f(I_B w_B)$ , т. е. зависимость ЭДС от МДС возбуждения, и вольт-амперные характеристики цепи возбуждения 1 и 2, определяющие падение напряжений в ней.

Обозначим через  $\alpha_1$  угол наклона линейного участка характеристики холостого хода, через  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  — угол наклона вольт-амперной характеристики цепи возбуждения.

Угол наклона вольт-амперной характеристики цепи возбуждения  $\alpha_2$  или  $\alpha_3$  зависит от величины сопротивления цепи возбуждения, так как

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{U \cdot m_F}{F \cdot m_U}, \quad (1.3)$$

где  $\alpha$  — угол наклона вольт-амперной характеристики цепи возбуждения, град.;  $U$  — напряжение, приложенное к цепи возбуждения, В;  $F$  — МДС обмотки возбуждения, А;  $m_F$  — масштаб по току, А/мм;  $m_U$  — масштаб по напряжению, В/мм.

Из приведенных на рис. 1.9, *а* характеристик видно, что в случае  $\alpha_3 > \alpha_1$  возбуждения машины не произойдет, так как согласно характеристикам при одной и той же величине МДС, например  $F_1$ , генератор выработает ЭДС  $E_1$ , а для создания такой же МДС на обмотке возбуждения необходимо напряжение  $U_1$ . Так как  $U_1 > E_1$ , то возбуждение машины невозможно. В случае  $\alpha_2 < \alpha_1$  машина возбуждается до точки *С*. Угол наклона начального участка характеристики холостого хода называют критическим углом  $\alpha_{кр}$ . Таким образом, условия самовозбуждения можно записать через углы:

$$\alpha \leq \alpha_{кр}. \quad (1.4)$$

В электромашинном усилителе обмотку самовозбуждения подбирают так, чтобы при отсутствии сигнала на обмотке управления усилитель не возбуждался, то есть выбирают  $\alpha > \alpha_{кр}$  (прямая 1 на рис. 1.9, *б*). Если на обмотку управления подать сигнал, создающий МДС  $I_y w_y = F_y$ , то вольт-амперная характеристика переместится параллельно прямой 1 и займет положение прямой 2. Усилитель возбуждается до точки *А*, и на клеммах якоря появится ЭДС  $E$ .



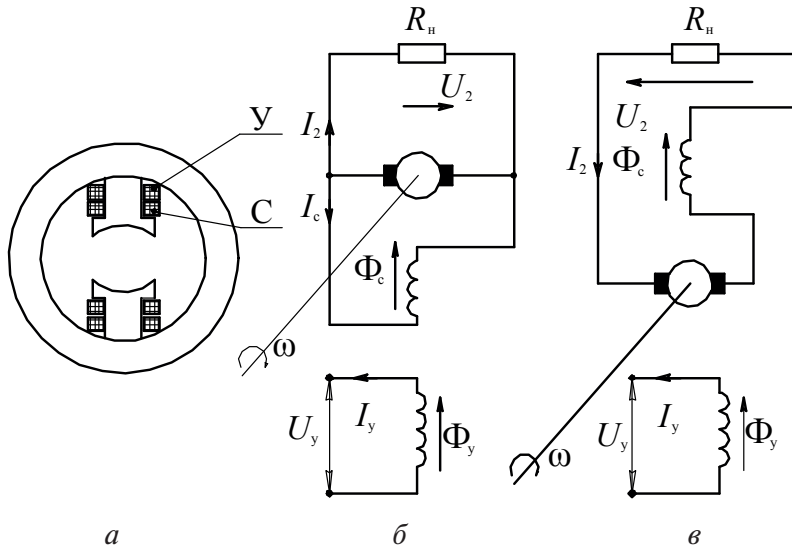


Рис. 1.8. Схема ЭМУ с самовозбуждением:

*a* — магнитная система индуктора; *б* — серийная обмотка включена как шунтовая; *в* — серийная обмотка включена как последовательная.

*У* — обмотка управления; *С* — обмотка самовозбуждения

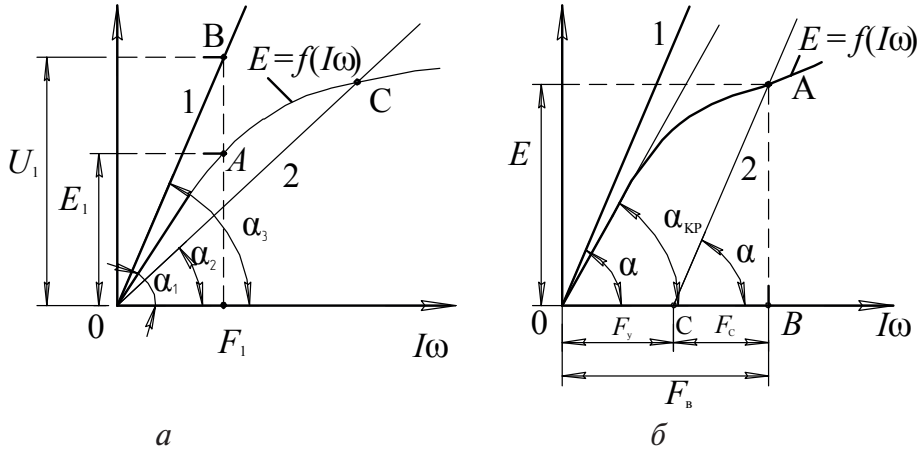


Рис. 1.9. Характеристики:

*a* — генератора с самовозбуждением; *б* — ЭМУ с самовозбуждением

Нетрудно заметить, что ЭДС  $E$  создается МДС возбуждения

$$F_B = F_y + F_c, \quad (1.5)$$

где  $F_y$  — МДС обмотки управления, А;  $F_c$  — МДС обмотки самовозбуждения, А.

Заменим отрезок характеристики  $OA$  на рис. 1.9, б прямой линией и рассмотрим треугольники  $OAB$  и  $CAB$ .

Из треугольника  $OAB$  определяем ЭДС обмотки якоря:

$$E = F_B \frac{m_U}{m_F} \operatorname{tg} \alpha_{\text{кр}}. \quad (1.6)$$

Из треугольника  $CAB$  находим ЭДС:

$$E = F_C \frac{m_U}{m_F} \operatorname{tg} \alpha. \quad (1.7)$$

Решая совместно соотношения (1.5)–(1.7), находим значение коэффициента усиления по мощности, выраженного через магнитодвижущие силы:

$$k_p = \frac{F_B}{F_Y} = \frac{1}{1 - \frac{\operatorname{tg} \alpha_{\text{кр}}}{\operatorname{tg} \alpha}}. \quad (1.8)$$

Из равенства (1.8) видно, что чем ближе угол наклона вольт-амперной характеристики обмотки самовозбуждения к  $\alpha_{\text{кр}}$ , тем больше коэффициент усиления по мощности усилителя. В критическом случае, когда  $\alpha = \alpha_{\text{кр}}$ , коэффициент усиления  $k_p = \infty$ .

В случае  $\alpha < \alpha_{\text{кр}}$  ЭМУС становится практически неуправляемым, то есть переходит в релейный режим из-за произвольного самовозбуждения при отсутствии сигнала на обмотке управления. Вследствие того, что магнитопровод усилителя имеет остаточное поле, выбирать  $\alpha$  достаточно близким к  $\alpha_{\text{кр}}$  нельзя, так как может произойти самовозбуждение. Поэтому в реальных усилителях выбирают угол наклона вольт-амперной характеристики на 3–5 % больше критического угла наклона характеристики  $E = f(F)$ .

При таких параметрах коэффициент усиления ЭМУС по мощности  $k_p$  достигает величины порядка 400–500.

Для определения динамических свойств электромашинного усилителя с самовозбуждением рассмотрим процесс самовозбуждения машины.

Допустим, что характеристика намагничивания линейна (прямая линия  $OA$ , рис. 1.9, б), скорость вращения генератора постоянна, вихревые токи малы.

Пусть на обмотку управления подано напряжение  $U_y$  (см. рис. 1.8, б). Тогда для холостого хода ЭМУС можно написать следующие уравнения равновесия ЭДС.

Для обмотки управления:

$$U_y = i_y \cdot R_y + L_y \frac{di_y}{dt} + M \frac{di_c}{dt}, \quad (1.9)$$

где  $i_y$  — ток в обмотке управления;  $i_c$  — ток в обмотке самовозбуждения;  $R_y$  — сопротивление обмотки управления;  $L_y$  — индуктивность обмотки управления;  $M$  — взаимоиנדуктивность между обмотками управления и самовозбуждения.

Для цепи самовозбуждения:

$$e_y = i_c \cdot (R_y + R_{я}) + L_c \frac{di_c}{dt} + M \frac{di_y}{dt}, \quad (1.10)$$

где  $e_y$  — мгновенное значение ЭДС обмотки якоря;  $R_{я}$  — сопротивление обмотки якоря;  $L_c$  — индуктивность обмотки самовозбуждения.

Для ЭДС ЭМУ:

$$e_y = (i'_y + i_c) R_k, \quad (1.11)$$

где  $i'_y = i_y \cdot \frac{w_y}{w_c} = k_{\text{ТР}} i_y$  — ток управления, приведенный к числу витков

обмотки самовозбуждения;

$w_y, w_c$  — соответственно числа витков обмоток управления и самовозбуждения;

$k_{\text{ТР}} = \frac{w_y}{w_c}$  — коэффициент трансформации между обмотками;

$R_k = \frac{E_{я} \cdot m_i}{I_B \cdot m_U} = \text{tg} \alpha_{\text{кр}}$  — критическое сопротивление контура возбуж-

дения, определяемое из треугольника  $AOB$  на рис. 1.9, б ( $I_B = I_y + I_c$  — полный ток возбуждения, соответствующий МДС возбуждения  $F_B$ ;  $E_{я}$  — ЭДС обмотки якоря).

Будем считать, что между обеими обмотками возбуждения существует полное магнитное сцепление, т. е.

$$M = \sqrt{L_y \cdot L_c}, \quad (1.12)$$

тогда можно записать

$$L_y = K_{\text{ТР}}^2 \cdot L_c; \quad M = L_c \cdot k_{\text{ТР}}; \quad L = k_{\text{ТР}} \cdot M. \quad (1.13)$$

Запишем уравнения равновесия ЭДС (1.9) и (1.10) в операторной форме. Для этого предварительно преобразуем члены этих уравнений с учетом выражений (1.11)–(1.13).

$$L_y p \cdot i_y + M \cdot p \cdot i_c = k_{\text{ТР}} \cdot M \cdot p \cdot i_y + M \cdot p \cdot i_c = M \cdot p \cdot (i_y + i_c) = \frac{M}{R_k} \cdot p \cdot e_y;$$

$$L_c p \cdot i_c + M \cdot p \cdot i_y = L_c \cdot p \cdot i_c + k_{\text{ТР}} \cdot L_c \cdot p \cdot i_y = L_c \cdot p \cdot (i_y + i_c) = \frac{L_c}{R_k} \cdot p \cdot e_y,$$

где  $p = \frac{d}{dt}$  — оператор.

В результате преобразования уравнения равновесия ЭДС можно записать в следующем виде:

$$R_y \cdot i_y + \frac{M}{R_k} \cdot p \cdot e_y = U_y, \quad (1.14)$$

где  $U_y$  — напряжение обмотки управления;

$$(R_c + R_y) \cdot i_c + \frac{L_c}{R_k} \cdot p \cdot e_y - e_y = 0, \quad (1.15)$$

где  $R_c$  — сопротивление обмотки самовозбуждения.

Умножим равенство (1.14) на  $k_{\text{ТР}}$  —  $(R_c + R_y) \cdot k_{\text{ТР}}$ , а выражение (1.15) — на  $R_y$ . С учетом выражения (1.11) получим уравнение напряжения генератора:

$$R_y \frac{(R_c + R_y)}{R_k} \cdot e_y + (k_{\text{ТР}} \cdot M \frac{R_c + R_y}{R_k} + \frac{R_y}{R_k} \cdot L_c) \cdot p \cdot e_y - R_y \cdot e_y = U_y \cdot k_{\text{ТР}} (R_c + R_y). \quad (1.16)$$

Здесь  $\frac{(R_c + R_y)}{R_k} = \varepsilon$  — коэффициент, учитывающий, насколько близ-

ко сопротивление цепи самовозбуждения к критическому значению.

Постоянная времени измеряется в секундах и определяется отношениями индуктивности к активному сопротивлению той цепи, которая рассматривается. В связи с этим

$$T_c = \frac{L_c}{(R_c + R_y)_c} \text{ — постоянная времени цепи самовозбуждения;}$$

$$T_y = \frac{L_y}{R_y} \text{ — постоянная времени обмотки управления.}$$

Используя выражение (1.13), имеем

$$e_{\text{я}} + \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} (T_y + T_c) \cdot p \cdot e_{\text{я}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot k_{\text{ТР}} \frac{R_k}{R_y} \cdot U_y. \quad (1.17)$$

Если учесть, что в начальный момент времени ( $t = 0$ ) ЭДС якоря также равна нулю, решение уравнения (1.16) примет следующий вид:

$$e_{\text{я}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot k_{\text{ТР}} \frac{R_k}{R_y} \cdot U_y \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} (T_y + T_c)}} \right). \quad (1.18)$$

Из уравнения (1.18) видно, что если к обмотке управления ЭМУС приложить напряжение управления  $U_y$ , то процесс нарастания ЭДС усилителя идет по экспоненциальному закону (рис. 1.10) с эквивалентной постоянной времени

$$T = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot (T_y + T_c). \quad (1.19)$$

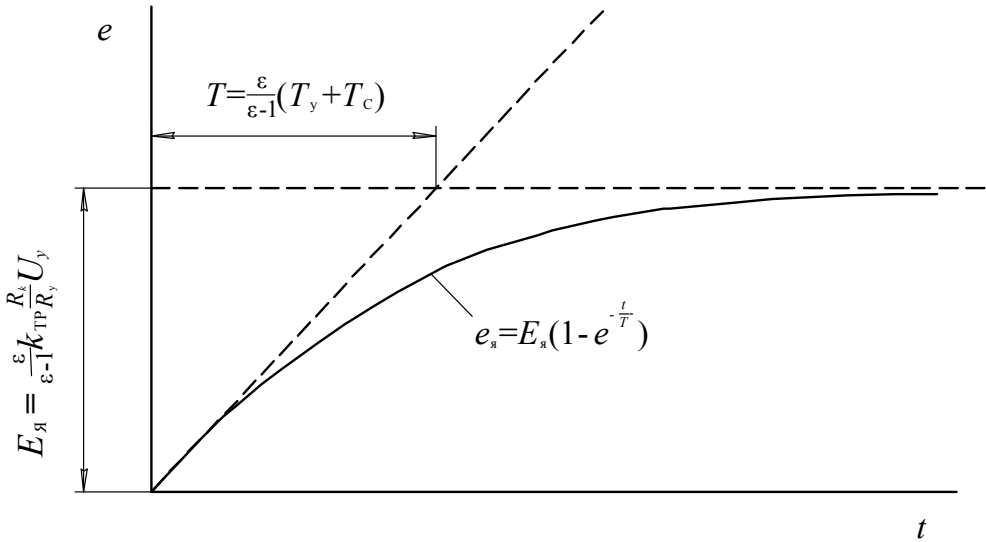


Рис. 1.10. Переходная характеристика ЭМУ с самовозбуждением

Установившееся значение ЭДС усилителя будет определяться по формуле

$$E_{\text{я}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot k_{\text{ТР}} \frac{R_k}{R_y} \cdot U_y. \quad (1.20)$$

Из выражения (1.20) можно найти коэффициент усиления по напряжению усилителя

$$k_u = \frac{E_y}{U_y} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot k_{\text{ТР}} \frac{R_k}{R_y}. \quad (1.21)$$

Выражения (1.19) и (1.21) показывают, что коэффициент усиления по напряжению  $k_u$  и его эквивалентная постоянная времени  $T$  пропорциональны  $\frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1}$ .

Так как в усилителях  $e > 1$  на 3–5 %, то эквивалентная постоянная времени  $T$  значительно превышает сумму постоянных времени обмоток самовозбуждения и управления. Например, если  $e = 1,03$ , то эквивалентная постоянная времени в 30–40 раз превышает сумму постоянных времени обмоток самовозбуждения и управления. Поэтому электромашинные усилители с самовозбуждением используются в тех случаях, когда не требуется большое быстродействие.

Уравнение (1.17) с учетом выражений (1.19)–(1.21) можно записать в следующем виде:

$$e_y + T \cdot p \cdot e_y = k_u \cdot U_y. \quad (1.22)$$

Отсюда видно, что ЭМУС представляет собой апериодическое звено с передаточной функцией

$$W(p) = \frac{e_y}{U_y} = \frac{k_u}{T \cdot p + 1}. \quad (1.23)$$

Такие усилители применяются главным образом для питания обмотки возбуждения генератора в системе генератор — двигатель, и в этом случае длительность переходного процесса определяется постоянной времени генератора.

## 2. Двухступенчатый электромашинный усилитель поперечного поля

---

Электромашинный усилитель поперечного поля — это одноякорный двухступенчатый усилитель с возбуждением во второй ступени от потока поперечной реакции якоря.

### 2.1. Принцип работы усилителя

В схеме ЭМУ с поперечным полем (см. рис. 2.1) показаны две обмотки управления, хотя их может быть и больше (четыре).

Якорь ЭМУ приводится во вращение от постороннего (обычно асинхронного) двигателя и ничем не отличается от якоря обычной машины постоянного тока.

На коллекторе устанавливается двойной комплект щеток: по поперечной  $q$  и продольной  $d$  осям. Щетки, установленные по поперечной оси, замыкаются накоротко, а к щеткам, расположенным по продольной оси, подключается сопротивление нагрузки  $R_n$ . ЭМУ с поперечным полем представляет собой генератор постоянного тока, состоящий из двух ступеней, включенных в каскад. В первой ступени магнитный поток создается обмоткой управления, а выходной обмоткой служит обмотка якоря, включенная между поперечными щетками.

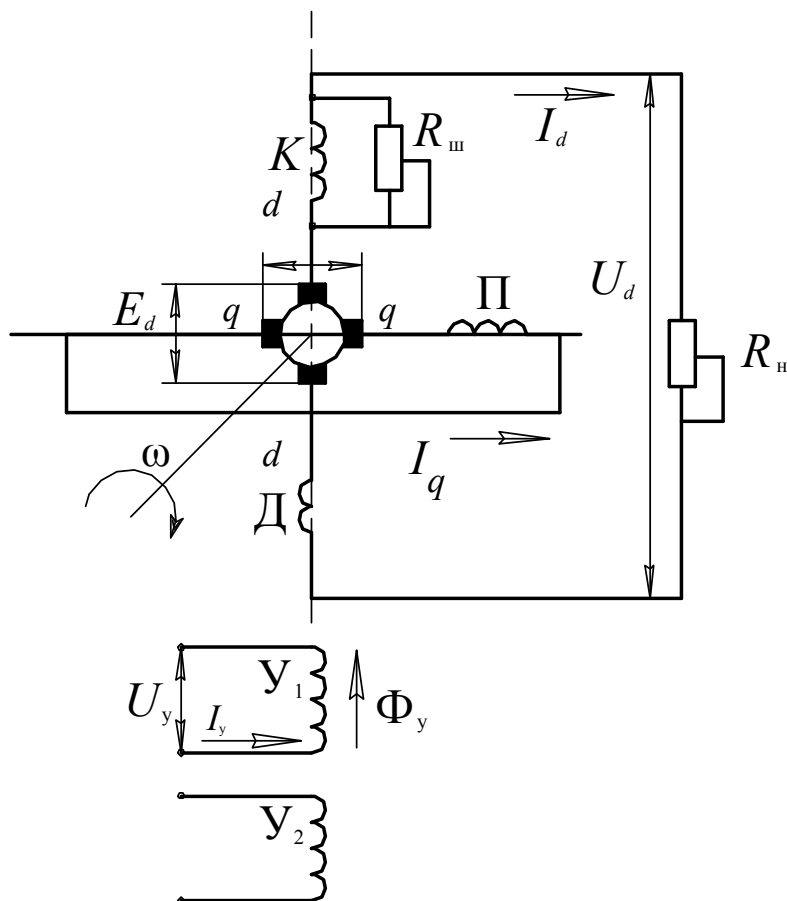


Рис. 2.1. Схема ЭМУ с поперечным полем

Последняя является одновременно входной обмоткой второй ступени и создает в ней магнитный поток; выходной же обмоткой второй ступени служит обмотка якоря, включенная между продольными щетками. При подаче управляющего сигнала  $U_y$  на обмотку управления по ней проходит ток  $I_y$ , создается небольшой продольный поток  $\Phi_y$  (см. рис. 2.2, а), который при вращении якоря индуцирует ЭДС между поперечными щетками:

$$E_q = c_e \Phi_y n. \quad (2.1)$$

Поскольку поперечные щетки замкнуты накоротко, по обмотке якоря будет проходить ток  $I_q$ , имеющий значительную величину, так как суммарное сопротивление в короткозамкнутой поперечной цепи  $\Sigma r_q$  мало:



$$I_q = E_q / \Sigma r_q. \quad (2.2)$$

При прохождении тока  $I_q$  по обмотке якоря возникает поперечный поток  $\Phi_{aq}$ , во много раз больший потока  $\Phi_y$  обмотки управления. Поток  $\Phi_{aq}$  (см. рис. 2.2, б) индуцирует между продольными щетками ЭДС

$$E_d = c_e \Phi_{aq} n, \quad (2.3)$$

которая создает ток нагрузки

$$I_d = E_d / (R_H + \Sigma r_d), \quad (2.4)$$

где  $R_H$  — сопротивление нагрузки;  $\Sigma r_d$  — суммарное сопротивление ЭМУ в цепи продольных щеток.

Магнитодвижущая сила якоря  $F_{ad}$ , создаваемая током  $I_q$ , направлена встречно МДС  $F_y$  обмотки управления, поэтому продольный поток якоря будет размагничивать машину.

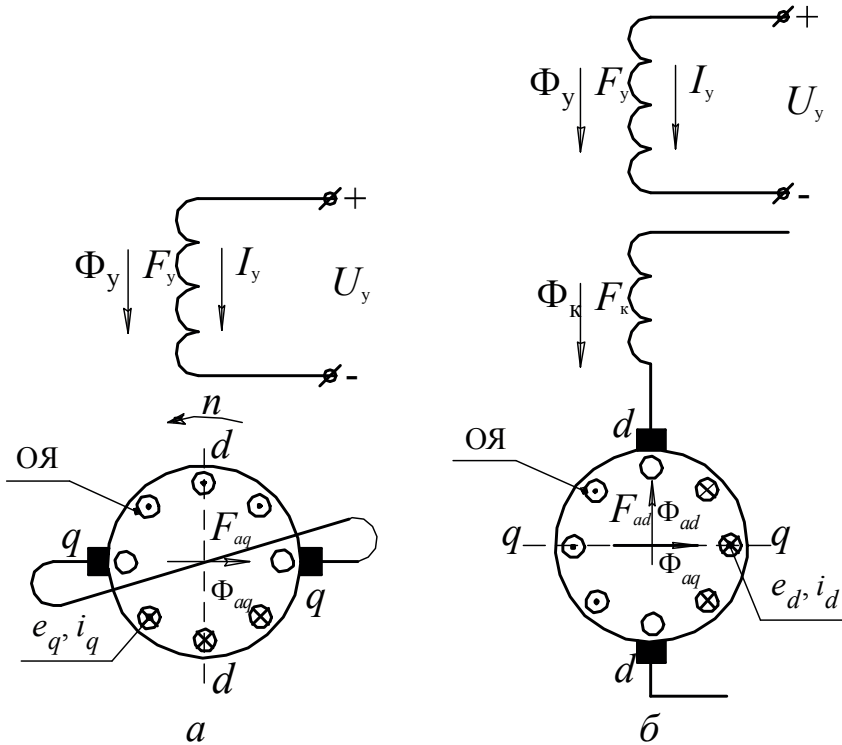


Рис. 2.2. Направление ЭДС, токов и магнитных потоков в первой — а и во второй — б ступенях ЭМУ с поперечным полем при положении щеток на геометрической нейтрали

Для компенсации МДС  $F_{ad}$  на статоре ЭМУ размещают компенсационную обмотку К, которую включают последовательно в цепь нагрузки. Для точного регулирования МДС  $F_k$  компенсационной обмотки параллельно ей присоединяют шунтирующий реостат  $R_{ш}$  (см. рис. 1.1).

Из рассмотренного принципа действия ЭМУ с поперечным полем очевидно, что изменяя небольшой по величине ток  $I_y$  в обмотке управления, можно управлять значительным током  $I_d$  в цепи нагрузки.

## 2.2. Коэффициент усиления ЭМУ поперечного поля

Коэффициент усиления представляет собой произведение коэффициентов усиления двух ступеней. При отсутствии насыщения магнитной системы машины поток управления

$$\Phi_y = F_y \lambda_{md} = I_y w_y \lambda_{md} = U_y w_y \lambda_{md} / R_y, \quad (2.5)$$

где  $\lambda_{md}$  — магнитная проводимость по продольной оси машины;  $R_y$  — сопротивление обмотки управления.

ЭДС  $E_q$  в контуре поперечных щеток

$$E_q = c_e \Phi_y n = c_e w_y U_y \lambda_{md} n / R_y. \quad (2.6)$$

Выходная мощность первой ступени

$$P_{\text{вых1}} = I_q E_q = E_q^2 / \Sigma r_q = c_e^2 w_y^2 U_y^2 n^2 \lambda_{md}^2 / (R_y^2 \Sigma r_q). \quad (2.7)$$

В выражении (2.7) суммарное сопротивление в цепи поперечных щеток  $\Sigma r_q$  включает сопротивление обмотки якоря  $R_a$ , сопротивление подмагничивающей обмотки  $R_{\Pi}$  и сопротивление щеточного контакта. А входная мощность первой ступени:

$$P_{\text{вх1}} = P_y = U_y I_y = U_y^2 / R_y. \quad (2.8)$$

Следовательно, коэффициент усиления первой ступени

$$K_{y1} = P_{\text{вых1}} / P_{\text{вх1}} = c_e^2 w_y^2 n^2 \lambda_{md}^2 / R_y \Sigma r_q. \quad (2.9)$$

Поперечный поток якоря

$$\Phi_{aq} = F_{aq} \lambda_{mq} = I_q w_a \lambda_{mq} = E_q w_a \lambda_{mq} / \Sigma r_q, \quad (2.10)$$

где  $\lambda_{mq}$  — магнитная проводимость по поперечной оси машины.

ЭДС в контуре продольных щеток:

$$E_d = c_e \Phi_{aq} n = c_e E_q w_a n \lambda_{mq} / \Sigma r_q = c_e^2 w_y w_a U_y n^2 \lambda_{mq} \lambda_{md} / R_y \Sigma r_q. \quad (2.11)$$

Выходная мощность второй ступени:

$$P_{\text{вых2}} = I_d E_d = E_d^2 / (\Sigma r_d + R_n) = c_e^4 w_y^2 w_a^2 U_y^2 n^4 \lambda_{mq}^2 \lambda_{md}^2 / (R_n + \Sigma r_d) R_y \Sigma r_q^2. \quad (2.12)$$

А входная мощность:

$$P_{\text{вх2}} = P_{\text{вых1}}.$$

Следовательно, коэффициент усиления второй ступени

$$K_{y2} = P_{\text{вых2}} / P_{\text{вх2}} = c_e^2 w_a^2 n^2 \lambda_{mq}^2 / \Sigma r_q (R_n + \Sigma r_d). \quad (2.13)$$

Общий коэффициент усиления ЭМУ

$$K_y = K_{y1} \cdot K_{y2} = c_e^4 w_y^2 w_a^2 n^4 \lambda_{mq}^2 \lambda_{md}^2 / (R_n + \Sigma r_d) R_y \Sigma r_q^2, \quad (2.14)$$

где  $\Sigma r_d$  — сумма всех сопротивлений обмоток (якоря, компенсационной и добавочных полюсов) и щеточного контакта, включенных последовательно в цепи продольных щеток.

Из выражения (2.14) следует, что коэффициент усиления зависит от скорости вращения в четвертой степени, а также от магнитных проводимостей по продольной и поперечной осям во второй степени. Таким образом, для создания ЭМУ поперечного поля с большим коэффициентом усиления по мощности необходимо проектировать его с ненасыщенной магнитной системой и минимальным воздушным зазором, а также на возможно большее значение скорости вращения.

При номинальной нагрузке он имеет обычно величину порядка 10000. Для повышения коэффициента усиления конструкция ЭМУ с поперечным полем имеет ряд специфических особенностей.

### 2.3. Устройство ЭМУ с поперечным полем

Обычно при мощности машины до нескольких киловатт электромашинный усилитель и приводной асинхронный двигатель располагаются в общем корпусе (см. приложение, рис. П. 1). Они имеют общий вал, на котором установлены пакет ротора приводного двигателя, якорь усилителя и его коллектор. При больших мощностях усилитель

выполняется в виде самостоятельной машины и соединяется муфтой с приводным двигателем. Для повышения коэффициента усиления конструкцию ЭМУ с поперечным полем выполняют с учетом ряда специфических особенностей.

Из выражения (2.14) следует, что для получения большого коэффициента усиления необходимо увеличивать скорость вращения ЭМУ; при использовании приводного асинхронного двигателя она составляет величину около 3000 об/мин. Воздушный зазор между статором и ротором выполняется небольшим, чтобы увеличить магнитные проводимости  $\lambda_{md}$  и  $\lambda_{mq}$  по продольной и поперечной осям. При увеличении числа витков  $w_a$  обмотки якоря коэффициент усиления увеличивается. Однако чем больше число витков обмотки якоря, тем больше индуктивность этой обмотки, которая снижает быстродействие усилителя, поэтому приходится ограничивать коэффициент усиления величиной порядка 10000, хотя в отдельных случаях были получены электромашинные усилители с  $K_y = 40000 - 80000$ . Для получения высокого быстродействия магнитопровод машины выполняется целиком шихтованным. Это уменьшает вихревые токи, возникающие при резких изменениях тока управления, и способствует быстрому изменению магнитного потока в соответствии с изменением сигнала управления. Магнитную систему машины выполняют обычно с неявно выраженными полюсами и с  $2p = 2$ .

Обмотки управления размещают в больших пазах статора, расположенных по поперечной оси машины, и выполняют в виде нескольких (в данном случае — четырех) катушек, имеющих отдельные выводы. Компенсационную обмотку обычно выполняют распределенной, располагая ее в нескольких пазах полюсных наконечников. В пазах, расположенных по продольной оси машины, размещают обмотку дополнительных полюсов и поперечную подмагничивающую обмотку. Для уменьшения влияния гистерезиса на работу ЭМУ вокруг спинки статора наматывают размагничивающую обмотку, питаемую переменным током. Поток этой обмотки замыкается в сердечнике статора, не проходя в якорь. Это способствует уменьшению намагничивающей силы остаточного магнетизма, которая создает погрешности в характеристиках ЭМУ.

Уменьшение величины зазора и увеличение скорости вращения значительно ухудшает коммутацию, поэтому в ЭМУ поперечного поля принимаются специальные меры для обеспечения безыскровой ком-

мутации. Чтобы обеспечить хорошую коммутацию под продольными щетками, главные полюса делают «расщепленными» (рис. 2.3), то есть каждый полюс разделяют на две части. Между ними располагают дополнительные полюса с соответствующими обмотками, которые и создают необходимое магнитное поле в зоне коммутации.

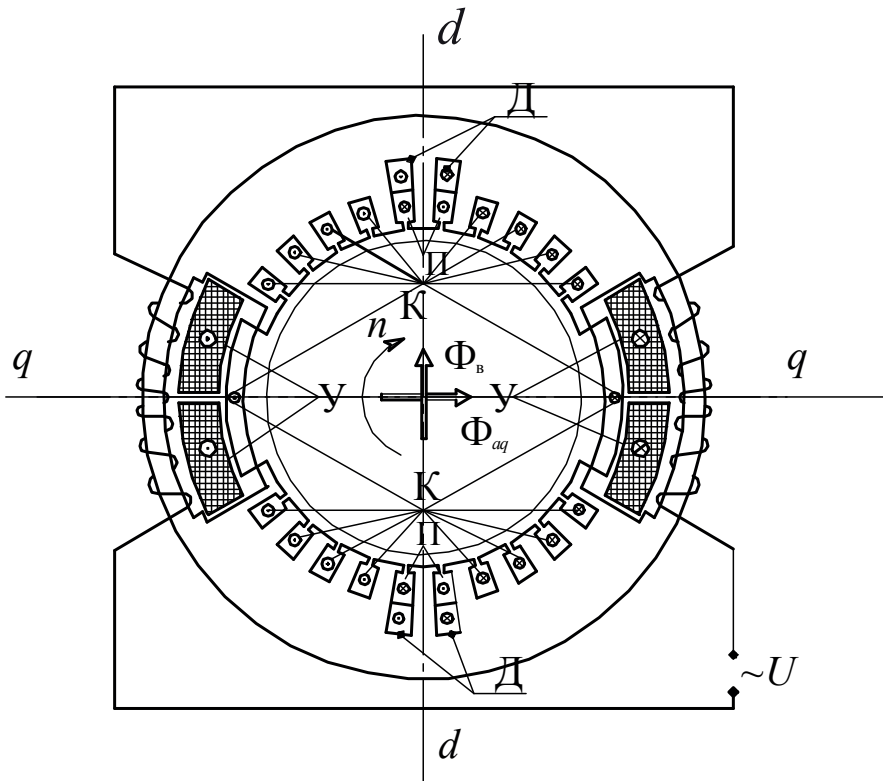


Рис. 2.3. Расположение обмоток в ЭМУ с поперечным полем

По поперечной оси машины дополнительные полюса для компенсации поля якоря в зоне коммутации не устанавливают, так как поток поперечной реакции якоря является рабочим потоком, а именно — полем возбуждения второй ступени усилителя. Поэтому для обеспечения безыскровой коммутации под поперечными щетками в ЭМУ предусматривают специальную поперечную подмагничивающую обмотку П (см. рис. 2.1). При ее наличии поперечный поток  $\Phi_q$ , требуемый для создания ЭДС  $E_d$ , получается не только от МДС якоря  $F_{aq}$ , но и от МДС подмагничивающей обмотки  $F_{\Pi}$ . Это дает возможность

уменьшить ток  $I_q$  при сохранении величины потока, действующего в поперечной оси. Снижение величины тока  $I_q$  приводит к уменьшению реактивной ЭДС, действующей в контуре коммутации, что благоприятно сказывается на работе поперечных щеток.

## 2.4. Статические характеристики ЭМУ

Важнейшим показателем ЭМУ поперечного поля является коэффициент усиления по мощности. Высокий коэффициент усиления получается за счет того, что ЭМУ поперечного поля является двухступенчатым. В самом деле, коэффициент усиления по мощности ЭМУ с поперечным полем

$$K_P = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{U_d I_d}{U_y I_y} \cdot \frac{E_q I_q}{E_q I_q} = \frac{U_d I_d}{E_q I_q} \cdot \frac{E_q I_q}{U_y I_y} = K_{P1} \cdot K_{P2}, \quad (2.15)$$

где  $K_{P1} = \frac{E_q I_q}{U_y I_y}$  — коэффициент усиления по мощности первой ступени усиления;

$K_{P2} = \frac{U_d I_d}{E_q I_q}$  — коэффициент усиления по мощности второй ступени

усиления.

Анализ ЭМУ может быть проведен также с помощью:

- коэффициентов усиления по току

$$K_i = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}},$$

где  $I_{\text{ВЫХ}} = I_d$ ;  $I_{\text{ВХ}} = I_y$ ;

- по напряжению

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}},$$

где  $U_{\text{ВЫХ}} = U_d$ ;  $U_{\text{ВХ}} = U_y$ .

Из выражения (2.15) видно, что коэффициент усиления ЭМУ по мощности

$$K_P = K_U \cdot K_i. \quad (2.16)$$

Коэффициент усиления по мощности ЭМУ с поперечным полем может достигать достаточно больших значений, находящихся в пределах  $10^3$ – $10^5$ .

Исходя из приведенных соотношений можно утверждать, что для получения более высокого коэффициента усиления по мощности надо:

а) увеличивать  $U_d$  ( $E_d$ ), то есть угловую частоту вращения якоря (до пределов, определенных условиями коммутации), или число витков обмотки якоря;

б) уменьшить  $I_y$ , то есть уменьшить воздушный зазор или увеличить число витков обмотки управления.

Но увеличение числа витков обмоток якоря и управления приведет к увеличению постоянных времени. Таким образом, требования максимального усиления и максимального быстродействия взаимно противоречивы. Заметим также, что для увеличения коэффициента усиления по мощности следует иметь магнитную систему ненасыщенной, то есть магнитные сопротивления для потока управления и поперечного потока сделать минимальными. Помимо увеличения  $K_p$  ненасыщенная магнитная система обеспечит также линейность статических характеристик электромашинного усилителя.

Основными статическими характеристиками ЭМУ поперечного поля являются характеристики холостого хода, внешние и регулировочные.

**Характеристики холостого хода** ЭМУ представляют собой зависимости

$$E_q = f(I_y); E_{do} = f(I_q); E_{do} = f(I_y)$$

при  $n = \text{const}$  и  $I_d = 0$  и являются кривыми намагничивания, характеризующими магнитную цепь машины (см. рис. 2.4). Для правильной работы ЭМУ необходимо, чтобы напряжение на выходе ЭМУ было прямо пропорционально напряжению сигнала управления. Исходя из этого требования ЭМУ должен работать на прямолинейном участке характеристики холостого хода, то есть магнитная цепь ЭМУ должна быть не насыщена. Тангенс угла наклона характеристики холостого хода дает коэффициент усиления ЭМУ по напряжению  $K_U = E_d/U_y$ . Поток остаточного магнетизма, который может вызвать самовозбуждение ЭМУ, уничтожается действием специально предусмотренной размагничивающей обмотки (см. рис. 2.3), подключенной к сети переменного тока.

**Внешняя характеристика ЭМУ** — зависимость выходного напряжения (или тока  $I_q$ ) от тока нагрузки при постоянном напряжении (токе) управления и частоте вращения:  $I_q, U_d = f(I_d), I_{yH} = \text{const}, n_H = \text{const}$ .

Напряжение на выходе ЭМУ при нагрузке ( $U_d$ ) определяется величиной ЭДС  $E_d$  и падением напряжения в сопротивлении продольной цепи якоря  $I_d \Sigma r_d$ . Причем ЭДС в продольной цепи при нагрузке может быть представлена как сумма ЭДС холостого хода  $E_{d0}$  и  $\Delta E_k$ , то есть  $E_d = E_{d0} \pm \Delta E_k$ .

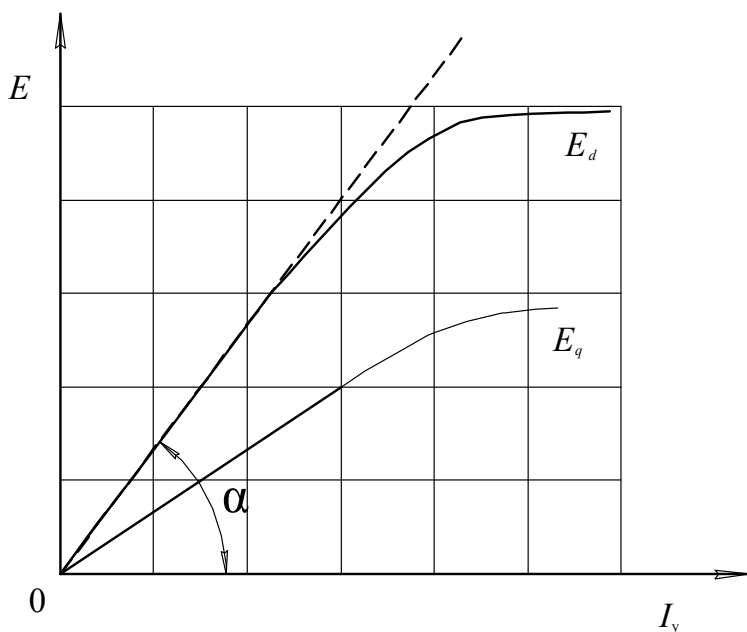


Рис. 2.4. Кривые намагничивания ЭМУ

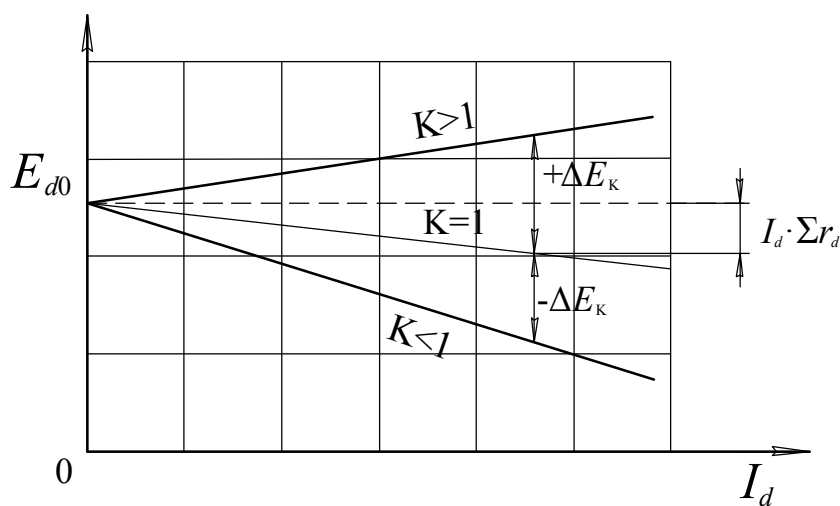


Рис. 2.5. Внешние характеристики ЭМУ



Тогда

$$U_d = E_{do} - I_d \Sigma r_d \pm \Delta E_k, \quad (2.17)$$

где  $\Delta E_k$  — ЭДС, обусловленная разностью потоков продольной реакции якоря и компенсационной обмотки, обозначенной как  $\Delta \Phi_k$ .

На рис. 2.5 представлены внешние характеристики ЭМУ при различной степени компенсации.

При полной компенсации  $K = 1$ ,  $F_d = F_k$ ,  $F_k = 0$  и, следовательно,  $U_d = E_{do} - I_d \Sigma r_d$ , то есть теоретическая внешняя характеристика прямолинейна и напряжение на выходе уменьшается только за счет падения напряжения в сопротивлении продольной цепи якоря.

При критической компенсации  $\Delta E_k = I_d \Sigma r_d$  и, следовательно,  $U_d = E_{do}$ , то есть внешняя характеристика горизонтальна.

При постоянной величине  $R_d$  и постоянной степени компенсации потока продольной реакции якоря, то есть при  $K = \text{const}$ , внешние характеристики ЭМУ представляют собой прямые линии, выходящие из точки  $E_{do}$ . Изменяя степень компенсации с помощью сопротивления  $R_{ш}$  (см. рис. 2.1), можно регулировать наклон характеристик в широких пределах.

Отметим, что при полной компенсации  $K = 1$  по продольной оси машины действует только одна магнитодвижущая сила обмотки управления. Следовательно, ЭДС  $E_q$ , снимаемая поперечными щетками, — величина постоянная, и поэтому ток  $I_q$  при изменении сопротивления нагрузки  $R_H$  во всем диапазоне остается неизменным. При перекомпенсации ( $K > 1$ ) с ростом нагрузки ток также будет расти, при недокомпенсации ( $K < 1$ ) — уменьшаться.

Внешние характеристики, полученные опытным путем, отличаются от теоретических, так как с увеличением тока нагрузки уменьшается степень компенсации потока реакции якоря и усиливается размагничивающее действие коммутационной реакции якоря, вследствие чего внешние характеристики приобретают криволинейный характер.

**Регулировочные характеристики ЭМУ** — это зависимости выходного напряжения или выходного тока от тока управления при  $\omega = \text{const}$  и  $R_H = \text{const}$  (см. рис. 2.6). Вид этих характеристик определяется формой кривой намагничивания машины.

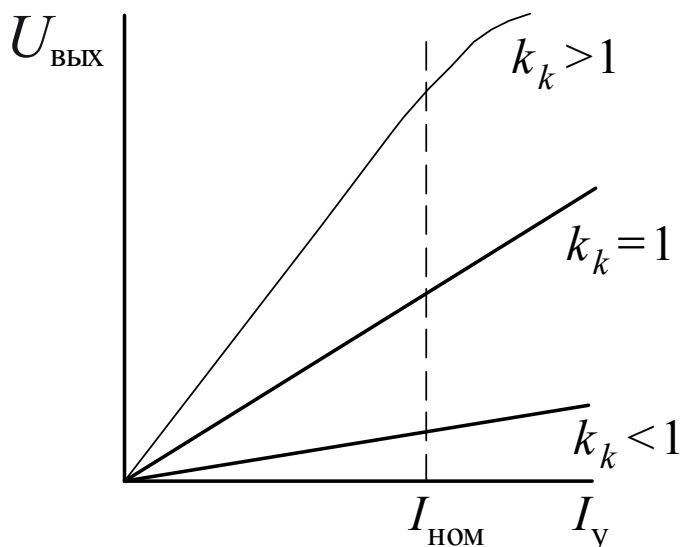


Рис. 2.6. Регулировочные характеристики ЭМУ

При малых токах управления нелинейность характеристики, то есть погрешность ЭМУ и, соответственно, непостоянство коэффициента усиления объясняются наличием остаточной ЭДС. В области больших токов управления нелинейность связана с насыщением магнитной цепи. Применение размагничивающей обмотки позволяет существенно уменьшить нелинейность регулировочных характеристик в этой области.

## 2.5. Динамические характеристики ЭМУ

Динамические свойства ЭМУ оценивают по характеру протекания переходного процесса, то есть по нарастанию напряжения в продольной цепи во времени  $U_d = f(t)$  при подаче напряжения на обмотку управления. Быстродействие ЭМУ в общем случае определяется постоянными времени соответствующих цепей: обмотки управления  $\tau_y = L_y / R_y$ , поперечной цепи  $\tau_q = L_a / \Sigma r_q$ , продольной цепи  $\tau_d = L_d (\Sigma r_d + R_n)$  и компенсационного контура  $\tau_k = L_k / R_k$ . В реальных

случаях, если  $R_n \gg \Sigma r_d$ , то  $\tau_d$  гораздо меньше трех остальных и ею с достаточной для практики точностью пренебрегают.

Для упрощения дальнейшего анализа допустим, что взаимоиндуктивность обмоток управления, компенсационной и дополнительных полюсов с обмотками поперечной цепи равна нулю. Это допущение незначительно замедляет переходный процесс, не нарушая, однако, физической картины процесса.

На рис. 2.7 приведена схема электромагнитных связей в ЭМУ во время переходного процесса с учетом вышеуказанных допущений.

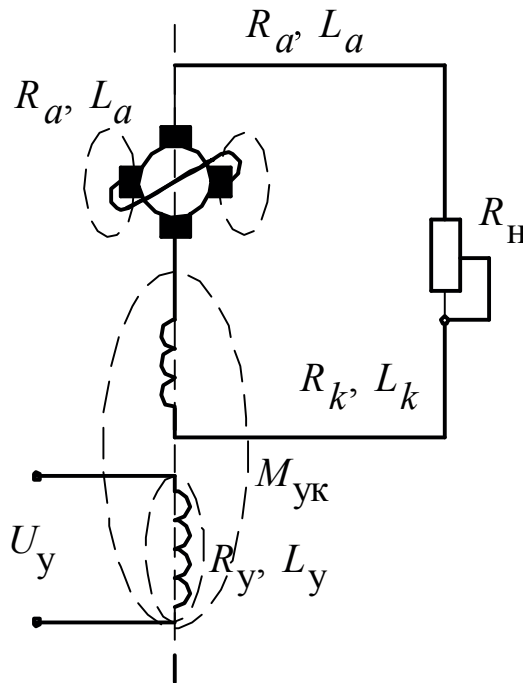


Рис. 2.7. Электромагнитные связи ЭМУ во время переходного процесса

Для определения нарастания выходной ЭДС во времени, когда щетки установлены на линии геометрической нейтрали, решается система из четырех уравнений равновесия ЭДС, записанных для каждого из контуров, указанных выше. Так, уравнение равновесия ЭДС по II закону Кирхгофа, например, для обмотки У можно записать в виде

$$U_y = R_y i_y + L_y \cdot \frac{di_y}{dt} + M_{yk} \cdot \frac{di_k}{dt}, \quad (2.18)$$

где  $M_{yk}$  — взаимоиндуктивность между обмоткой управления и компенсационной обмоткой.

Если принять  $M_{yk} = 1$  и перейти к изображениям, то уравнения для четырех контуров можно свести к одному операторному уравнению второго порядка

$$K_U U_y = (\tau_y + \tau_k) \cdot \tau_q \cdot E_d p^2 + (\tau_y + \tau_k + \tau_q) \cdot E_d p + E_d, \quad (2.19)$$

где  $K_U$  — коэффициент усиления ЭМУ по напряжению.

Решение приведенного уравнения при приложении напряжения на обмотку управления ступенчатой формы может быть получено в виде

$$E_d = K_U \cdot U_y \cdot \left( 1 - \frac{\tau_y + \tau_k}{(\tau_y + \tau_k) - \tau_q} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_y + \tau_k}} + \frac{\tau_q}{(\tau_y + \tau_k) - \tau_q} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_q}} \right). \quad (2.20)$$

Это уравнение может быть упрощено. Поскольку в ЭМУ, как правило, постоянными времени  $\tau_y$  и  $\tau_k$  в первом приближении можно пренебречь, тогда решение уравнения переходного процесса запишется следующим образом:

$$E_d = K_U \cdot U_y (1 - e^{-\frac{t}{\tau_q}}). \quad (2.21)$$

Из приведенных соотношений видно, что ЭМУ в первом случае (см. выражение (2.20)) представляет собой два последовательных апериодических звена, во втором (см. выражение (2.21)) — одно.

Передаточная функция ЭМУ поперечного поля может быть найдена из операторного уравнения переходного процесса (2.19):

$$W(p) = \frac{E_d}{U_y} = \frac{K_U}{1 + (\tau_y + \tau_k + \tau_q)p + (\tau_y + \tau_k)\tau_q p^2}. \quad (2.22)$$

Таким образом, кривая нарастания напряжения на выходе ЭМУ поперечного поля отличается от экспоненты.

В первом приближении можно считать кривую нарастания напряжения экспонентой с постоянной времени (см. рис. 2.8):

$$T_y \approx (\tau_y + \tau_k) + \tau_q. \quad (2.23)$$

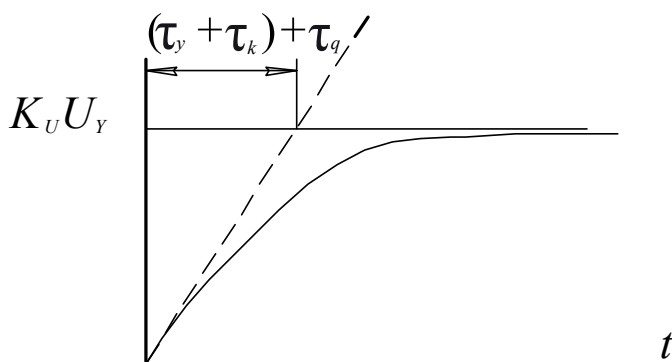


Рис. 2.8. Кривая нарастания напряжения

## 2.6. Преимущества и недостатки ЭМУ

ЭМУ поперечного поля получили наибольшее распространение. Эти усилители обладают рядом достоинств, главными из которых являются:

- 1) большой коэффициент усиления по мощности ( $k_p = 10^3 - 10^5$ );
- 2) малая входная мощность, позволяющая питать обмотки управления от полупроводниковых усилителей малой мощности;
- 3) достаточное быстродействие, то есть малые постоянные времени цепей усилителя. Время нарастания напряжения от нуля до номинального значения для промышленных усилителей мощностью 1–5 кВт составляет 0,05–0,1 с;
- 4) достаточные надежность, долговечность и широкие пределы изменения мощности;
- 5) возможность изменения характеристик за счет изменения степени компенсации, позволяющая получать необходимые внешние характеристики.

К числу недостатков электромашинных усилителей следует отнести:

- 1) относительно большие габариты и вес по сравнению с генераторами постоянного тока той же мощности, так как для получения больших коэффициентов усиления применяется ненасыщенная магнитная цепь;
- 2) наличие остаточного напряжения за счет гистерезиса;
- 3) недостаточно высокое быстродействие. Например, у ЭМУ мощностью до 750 Вт эквивалентная электромагнитная постоянная времени составляет порядка 0,1–0,2 с.

### 3. Испытание электромашинных усилителей поперечного поля

---

При изучении электрических микромашин систем автоматики предусмотрен раздел «Электромашинные усилители».

Одним из важных этапов изучения является закрепление теоретического материала по указанному разделу курса путем ознакомления с конструктивным исполнением и проведением испытаний электромашинного усилителя с поперечным полем.

Наряду с изучением конструктивных особенностей и основных характеристик ЭМУ исследуются его параметры. Экспериментальное исследование характеристик и параметров ЭМУ поперечного поля может стать одной из тем выпускной работы для бакалавров, обучающихся по профилю «Электромеханика». В рамках этой темы могут быть выполнены исследования характеристик ЭМУ и влияние сдвига щеток с геометрической нейтральной на эти характеристики.

Испытания ЭМУ поперечного поля проводятся на лабораторном стенде в лаборатории «Электрические машины систем автоматики» кафедры электрических машин.

#### *3.1. Описание испытательного стенда ЭМУ поперечного поля*

---

На рис. 3.1 приведены фотографии ЭМУ и стенда для проведения его испытаний. Для исследований в лабораторной установке используется электромашинный усилитель типа ЭМУ-5 А.

Питание на лабораторный стенд подается от трехфазной сети 380 В с помощью розетки и вилки. Включение двигателя ЭМУ осу-

ществляется отдельным выключателем, расположенным на стенде. Напряжение на обмотку управления подается от управляемого выпрямителя. Регулирование напряжения управления осуществляется с помощью потенциометра.

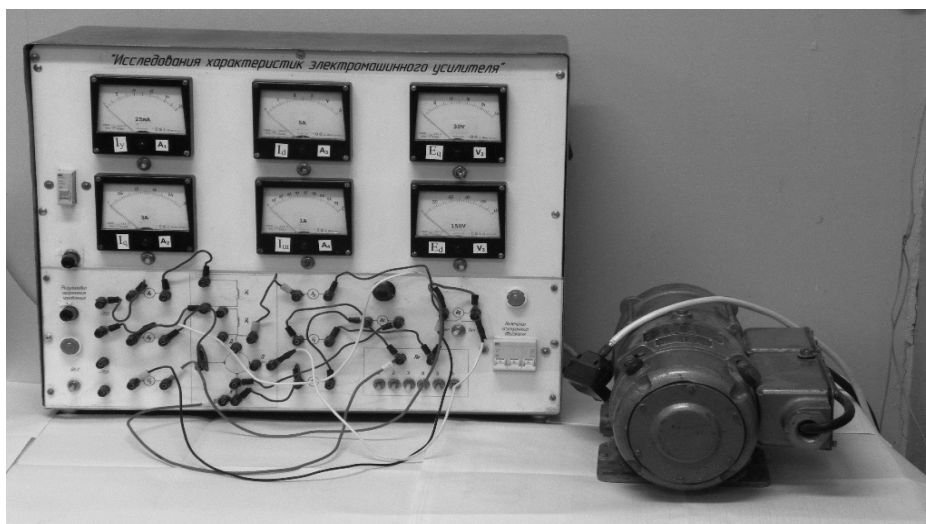


Рис. 3.1. Общий вид стенда для испытаний электромашинного усилителя

Для измерения напряжений и токов в обмотках усилителей используются магнитоэлектрические приборы. Для каждого прибора предусмотрен тумблер для изменения полярности подаваемого на него сигнала. Лабораторный стенд имеет наборное поле с мнемонической схемой и клеммами, к которым подключены обмотки ЭМУ, измерительные приборы и элементы цепей нагрузки управления и поперечной цепи. На панели расположены также ручки элементов управления, переключатели.

Перед проведением испытаний следует ознакомиться с конструкцией электромашинного усилителя и основными его деталями, представленными на планшете. Изучить расположение обмоток в магнитной системе и их назначение в ЭМУ поперечного поля.

Перед началом опытов нужно ознакомиться с лабораторным стендом, электроизмерительными приборами, используемыми в лабораторной установке. Записать в отчет паспортные данные и параметры обмоток электромашинного усилителя. В соответствии с программой исследования собрать схему для проведения опыта.

### 3.2. Определение параметров и постоянных времени

Как было показано, быстродействие ЭМУ определяется постоянными времени, значение которых можно найти из осциллограммы изменения во времени тока в соответствующей обмотке или расчетом по значениям индуктивности ( $L$ ) и сопротивления ( $R$ ) соответствующей обмотки.

#### 3.2.1. Определение постоянных времени осциллографированием переходного процесса

Для определения постоянных времени по этому способу необходимо собрать схему, представленную на рис. 3.2, для проведения опыта. В этом случае обычно снимается осциллограмма спада тока при закорачивании обмотки  $L$ . Регулирующим сопротивлением  $R_p$  выставить в испытуемой обмотке ток, равный номинальному. Затем переводом переключателя  $\Pi$  в положение  $\Pi$  на экране осциллографа с запоминанием сигнала либо с помощью шлейфового осциллографа получить кривую затухания тока во времени.

Постоянная времени определяется из осциллограммы как время затухания тока до величины  $\sim 37\%$  от начального значения.

Данным способом можно определять постоянную времени обмотки управления  $\tau_y$ , поперечной цепи  $\tau_q$  и компенсационной обмотки  $\tau_k$ . Данные измерения заносятся в таблицу ниже.

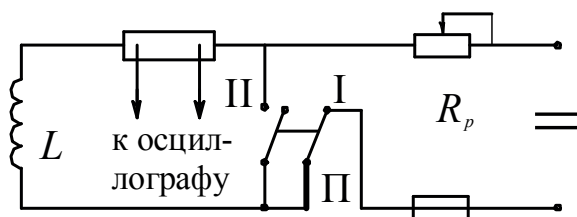


Рис. 3.2. Схема для определения постоянных времени

Значения постоянных времени ЭМУ поперечного поля

Постоянные времени	№ опыта			$\tau_{\text{сред}}$
	1	2	3	
$\tau_y$				
$\tau_q$				
$\tau_k$				
$T_y$				



Быстродействие ЭМУ можно определить по осциллограмме выходного напряжения ЭМУ при холостом ходе машины и скачкообразном включении тока управления. В этом случае из осциллограммы определяется эквивалентная постоянная времени ЭМУ, равная времени достижения  $\sim 63\%$  установившегося значения напряжения на выходной обмотке ЭМУ. Для определения постоянной времени по этому способу необходимо предварительно установить номинальное значение тока возбуждения  $I_{yn}$  (ключ П на рис. 3.2 должен находиться в положении I), а затем перевести ключ П в исходное положение II. В момент подачи тока управления  $I_y$  (положение ключа I) на экране осциллографа регистрируется кривая нарастания напряжения. Эквивалентная постоянная времени ЭМУ определяется от момента подачи напряжения на обмотку управления до момента достижения  $\sim 63\%$  установившегося значения напряжения на выходной обмотке ЭМУ.

### 3.2.2. Определение постоянной времени расчетным путем

Для определения параметров ЭМУ необходимо собрать схему, приведенную на рис. 3.3.

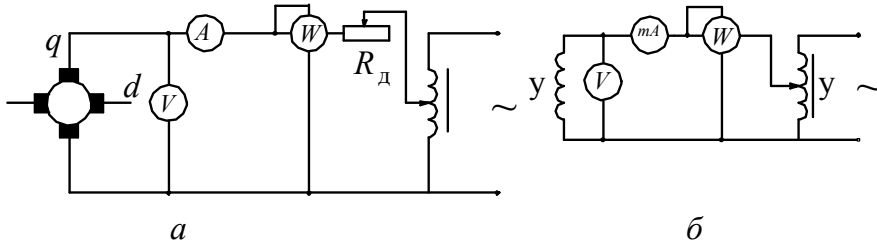


Рис. 3.3. Схема опытов для определения параметров обмоток:

$a$  — поперечной цепи,  $б$  — управления

С помощью лабораторного трансформатора на испытуемую обмотку подается напряжение, при котором ток будет равен номинальному. При этом фиксируются показания амперметра, вольтметра и ваттметра. По полученным значениям определяют активное, индуктивное, полное сопротивление и индуктивности обмоток ЭМУ по следующим соотношениям:

$$Z = \frac{U}{I} [\text{Ом}]; R = \frac{P}{I^2} [\text{Ом}];$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} [\text{Ом}]; L = \frac{X}{2\pi \cdot f} [\text{Гн}],$$

где  $f$  — частота тока, Гц.

Тогда постоянная времени данной обмотки определяется как

$$T = \frac{L}{R}.$$

При определении постоянной времени поперечной цепи необходимо использовать амперметр и дополнительно включить балластное сопротивление  $R_d = 20 \div 100$  Ом для ограничения тока (рис. 3.3, а).

Для определения постоянной времени цепи управления в схеме необходимо включить миллиамперметр (рис. 3.3, б). С помощью ЛАТРа устанавливают 3–4 значения напряжений и данные заносят в таблицу (см. ниже). Для каждого из напряжений вычисляются значения постоянных времени, а затем определяются их средние значения. На основе выполненных исследований следует дать сравнение экспериментальных и расчетных значений постоянных времени обмоток. Определить по приближенной формуле (2.23) постоянную времени усилителя и дать ее сравнение с экспериментальным значением постоянной времени на холостом ходу ЭМУ, найденному по осциллограммам.

**Данные расчета постоянных времени**

Постоян- ные времени	Опыт			Расчет				$\tau$	$\tau_{\text{ср}}$
	$U$ , В	$I$ , А	$W$ , Вт	$Z$ , Ом	$R$ , Ом	$X$ , Ом	$L$ , Гн		
$\tau_y$									
$\tau_q$									
$\tau_k$									

### 3.3. Исследование характеристик холостого хода

#### 3.3.1. Пояснения к проведению испытаний

Наличие в ЭМУ поперечного поля двух ступеней усиления поступающего сигнала приводит к необходимости иметь для расчетов коэффициентов усиления характеристики холостого хода для каждой ступени отдельно: характеристику холостого хода первой ступени  $E_q = f(I_y)$ ,  $n = \text{const}$ ,  $I_q = 0$ ; характеристику холостого хода второй ступени  $E_d = f(I_q)$  и результирующую характеристику холостого хода ЭМУ  $E_d = f(I_y)$  при  $n = \text{const}$ ,  $I_d = 0$ .

По результирующей характеристике или характеристике холостого хода второй ступени может быть определена остаточная ЭДС усилителя.

Для снятия характеристик собирается схема по рис. 3.4.

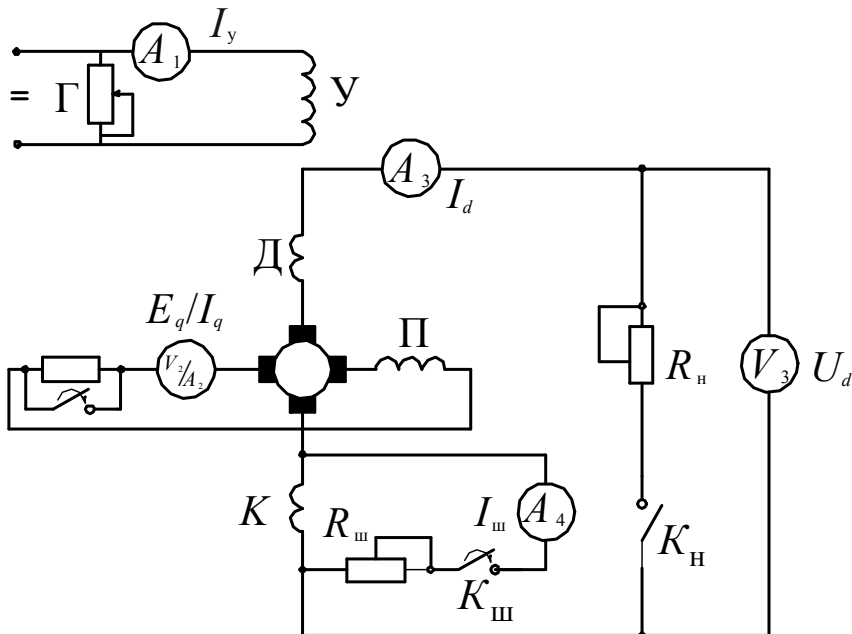


Рис. 3.4. Схема для снятия характеристик ЭМУ

Предварительно необходимо размагнитить магнитную цепь усилителя. Размагничивание сердечника можно осуществить путем вклю-

чения размагничивающей обмотки (если такая имеется в усилителе) в цепь переменного тока. Наиболее удобно размагничивание выполнить путем кратковременной подачи напряжения противоположной полярности на обмотку управления. После полного размагничивания необходимо восстановить исходную полярность напряжения на обмотке управления.

На лабораторном стенде имеется возможность снять указанные характеристики холостого хода одновременно, а не покаскратно, для чего в поперечной цепи установлен переключатель. При размыкании этого переключателя ( $I_q = 0$ ) фиксируются значения  $I_y$  и  $E_q$ , то есть снимается точка характеристики холостого хода первой ступени. Затем, не изменяя величины тока обмотки  $I_y$ , замыкают переключатель и фиксируют значение  $I_q$  и  $E_d$ , то есть снимаются точки, соответствующие характеристике холостого хода второй ступени и результирующей характеристике холостого хода.

Во время проведения этого опыта, при изменении положения движка потенциометра  $\Gamma$ , расположенного на передней панели, ток в обмотке управления плавно изменяется от  $I_y = 0$  до  $I_y = I_{yn}$ , соответствующего на холостом ходу ЭМУ  $U_{d0} \approx 1,1 U_{dn}$  (восходящая ветвь). Затем снимается нисходящая ветвь путем плавного уменьшения тока управления до 0. Во время опыта делается не менее 6 отсчетов на каждую ветвь. Результаты заносятся в таблицу (см. ниже). При снятии обратной (нисходящей) ветви следует обязательно зафиксировать остаточную ЭДС при  $I_y = 0$ .

Полученные характеристики холостого хода следует построить на одном графике.

**Характеристики холостого хода 1-й и 2-й ступени**

Измеряемые параметры	Результаты измерений							
$I_y$ (mA)								
$E_q$ (B)								
$I_q$ (mA)								
$E_d$ (B)								

### 3.3.2. Анализ результатов снятия характеристик холостого хода

Характеристики холостого хода представляют собой зависимости  $E_q = f(I_y)$ ,  $E_d = f(I_q)$  при  $n = \text{const}$  и  $I_d = 0$  и являются кривыми намагничивания, характеризующими магнитную цепь машины. Поскольку ток  $I_q$  больше, чем ток  $I_y$ , кривая намагничивания второй ступени пойдет выше, чем кривая намагничивания первой ступени. Для правильной работы ЭМУ необходимо, чтобы напряжение на выходе ЭМУ было прямо пропорционально напряжению сигнала управления. Исходя из этого требования ЭМУ должен работать на прямолинейном участке характеристики холостого хода, то есть магнитная цепь ЭМУ должна быть не насыщена.

Оценка магнитного состояния может быть определена при помощи коэффициента насыщения как отношение тока управления при заданной ЭДС по кривой намагничивания к току управления на прямолинейном участке кривой.

Наличие остаточной ЭДС, наводимой в якоре потоком остаточного магнетизма, искажает линейную зависимость выходного напряжения от входного сигнала в зоне малых сигналов и нарушает однозначность зависимости выходных параметров ЭМУ от входных при изменении полярности входного сигнала. В результате поток остаточного магнетизма при постоянной полярности сигнала будет увеличивать поток управления, а при изменении полярности сигнала — уменьшать поток управления. Кроме того, под действием остаточной ЭДС ЭМУ, работающий в режиме перекомпенсации, при малом сопротивлении нагрузки и нулевом входном сигнале может самовозбуждаться и терять управляемость. При работе ЭМУ в системе ЭМУ—двигатель необходимо, чтобы остаточная ЭДС была меньше напряжения трогания двигателя на холостом ходу ( $E_{\text{ост}} < U_{\text{тр0}}$ ), в противном случае это приведет к появлению самохода двигателя.

## 3.4. Снятие внешних характеристик

### 3.4.1. Анализ результатов испытаний

Для снятия внешних характеристик ЭМУ к ранее собранной схеме присоединяют цепь нагрузки с помощью тумблера « $K_n$ » нагрузки. Внешние характеристики следует снять для различной степени компенсации продольного потока реакции якоря.

Настройку полной компенсации можно осуществить двумя способами:

- 1) по падению напряжения в цепи нагрузки ЭМУ;
- 2) по показаниям амперметра в поперечной цепи.

Для настройки **по первому способу** необходимо опытным путем определить сопротивление в цепи продольных щеток на неподвижном якоре при питании от источника постоянного тока. Опыт необходимо провести при различных положениях якоря. При этом величина тока якоря должна составлять 50–70 % от номинального значения. Величина падения напряжения в продольной цепи якоря может быть найдена также по паспортным данным сопротивлений обмоток якоря ЭМУ. При этом величину падения напряжения в щеточном контакте можно принять приближенно равной  $(1,5 \div 2)$  В. Задавшись величиной тока нагрузки, определяют изменение напряжения при нагрузке ЭМУ по сравнению с режимом холостого хода и сравнивают это изменение с расчетным значением падения напряжения в продольной цепи при заданном значении тока. Путем регулирования степени компенсации с помощью шунтирующего сопротивления  $R_{ш}$  можно добиться равенства указанных значений, что будет соответствовать полной компенсации продольной размагничивающей реакции якоря.

Наиболее просто реализуется **второй способ** компенсации, который можно осуществить, если есть возможность включить в поперечную цепь амперметр. При настройке ЭМУ на полную компенсацию нужно с помощью сопротивления  $R_{ш}$  добиться постоянства тока в поперечной цепи  $I_q$  при изменении тока нагрузки от 0 до максимума при постоянном номинальном токе управления. В случае перекомпенсации ток  $I_q$  увеличивается при увеличении тока нагрузки  $I_d$ , а в случае недокомпенсации — уменьшается.

Для снятия внешней характеристики ЭМУ при полной компенсации опыт проводится в следующем порядке: в обмотке управления устанавливают ток  $I_{ун}$ , то есть ток управления, соответствующий на холостом ходу ЭМУ  $U_{до} = 1,1 U_{дн}$ . Увеличивая ток нагрузки  $I_d$  с помощью реостата от нуля (цепь нагрузки разомкнута) до  $1,5 I_{дн}$ , записывают показания приборов. При этом ток в поперечной цепи должен оставаться постоянным. Делается 6–8 отсчетов, результаты заносятся в таблицу (см. ниже).

**Внешняя характеристика ЭМУ при полной компенсации**

№ п/п	Опыт					Расчет						
	$I_y$	$U_y$	$I_q$	$I_d$	$U_d$	$E_q$	$P_y$	$P_q$	$P_d$	$K_{p1}$	$K_{p2}$	$K_p$

На основании данных опыта строится внешняя характеристика ЭМУ  $U_d = f(I_d)$  для случая полной компенсации.

По опытным данным рассчитываются коэффициенты усиления ЭМУ по мощности следующим образом.

Коэффициент усиления первой ступени

$$K_{p1} = \frac{P_q}{P_y} = \frac{E_q I_q}{U_y I_y},$$

где  $P_y$  — мощность, потребляемая цепью управления, Вт;  $P_q$  — мощность, поглощаемая в цепи короткозамкнутых щеток по поперечной оси, Вт;  $E_q$  — ЭДС в цепи поперечных щеток, которая определяется с помощью имеющейся характеристики холостого хода первой ступени усиления для номинального тока управления  $I_{yn}$ , В.

Напряжение управления определяется по величине заданного значения тока управления  $I_{yn}$  и величине сопротивления обмотки управления, которое находится опытным путем или берется по паспортным данным усилителя.

Коэффициент усиления по мощности второй ступени.

$$K_{p2} = \frac{P_d}{P_q} = \frac{U_d I_d}{E_q I_q},$$

где  $P_d$  — полезная мощность на выходе ЭМУ, Вт;  $U_d$  — напряжение на выходе ЭМУ, В;  $I_d$  — ток нагрузки, А.

Общий коэффициент усиления:

$$K_p = K_{p1} \cdot K_{p2}.$$

По расчетным данным строятся зависимости коэффициентов усиления ЭМУ от нагрузки  $(K_p, K_{p1}, K_{p2}) = f(I_d)$ .

Все эти расчеты и построения проводятся только для случая полной компенсации.

Для снятия внешней характеристики ЭМУ при перекомпенсации используется та же схема, что и в предыдущем случае, только теперь сопротивление  $R_{ш}$ , шунтирующее компенсационную обмотку, вводится полностью (положение, близкое к разрыву шунтирующей цепи КО).

Снятие этой характеристики проводится аналогично первой, при этом необходимо обратить внимание на то, что при  $I_d = 0$  выходное напряжение  $U_d$  было таким же, как и при снятии внешней характеристики при полной компенсации. Проверка настройки ЭМУ на режим перекомпенсации производится по характеру изменения тока  $I_q$ , он должен увеличиваться с увеличением тока нагрузки  $I_d$ . Результаты опыта следует занести в таблицу (ниже).

**Внешняя характеристика ЭМУ при перекомпенсации**

Измеряемые величины	Результаты измерений						
$I_d$ (А)							
$U_d$ (В)							
$I_q$ (А)							

Для снятия внешней характеристики в случае недокомпенсации сопротивления  $R_{ш}$  в схеме выводится таким образом, чтобы при минимальном сопротивлении в цепи нагрузки напряжение на выходе составило  $15 \div 20\%$  от  $U_{дн}$ . Проверка производится по уменьшению тока  $I_q$  с ростом  $I_d$ . Результаты опыта заносятся в таблицу (ниже).

**Внешняя характеристика ЭМУ при недокомпенсации**

Измеряемые величины	Результаты измерений						
$I_d$ (А)							
$U_d$ (В)							
$I_q$ (А)							



Все три внешние характеристики строятся на общем графике и должны иметь при  $I_d = 0$  общую точку. На отдельном графике целесообразно построить также зависимости  $I_q = f(I_d)$ , характеризующие степени компенсации продольного потока реакции якоря с ростом нагрузки.

### 3.4.2. Анализ результатов исследований внешних характеристик

При полной компенсации по продольной оси машины действует результирующая МДС по продольной оси, равная магнитодвижущей силе обмотки управления. Следовательно, ЭДС, снимаемая поперечными щетками,  $E_q$  — величина постоянная, и поэтому ток  $I_q$  при изменении сопротивления нагрузки  $R_n$  во всем диапазоне остается постоянным. В случае перекомпенсации или недокомпенсации МДС по продольной оси равна:

$$F_d = F_k + F_y - F_{ad}.$$

Так как магнитная цепь машины не насыщена,

$$\Phi_d = \Phi_k + \Phi_y - \Phi_{ad} = \Phi_y \pm \Delta\Phi_k,$$

где  $\Delta\Phi_k = \Phi_k - \Phi_{ad}$ ;  $\Phi_k \equiv I_d$  и  $\Phi_{ad} \equiv I_d$ .

Следовательно,  $\Delta\Phi_k \equiv I_d$ . Величина ЭДС по продольной оси  $E_d = C_e \cdot \Phi_q \cdot n$  определяется потоком, действующим по поперечной оси:

$$\Phi_q = \frac{w_a \cdot E_q \cdot \lambda_{mq}}{\Sigma R_q} = \frac{C_e \cdot w_a \cdot \lambda_{mq} \cdot n}{\Sigma R_q} \cdot \Phi_d,$$

тогда, подставляя величину потока по поперечной оси в выражение для ЭДС  $E_d$  и учитывая, что  $\Delta\Phi_k \equiv I_d$ ,  $I_y = \text{const}$ ,  $E_{d0} = \text{const}$ , а  $\Delta E_k \equiv I_d$ ,  $\Delta\Phi_k \equiv I_d$ , получаем:

$$E_d = \frac{C_e^2 \cdot n^2 \cdot w_a \cdot \lambda_{mq}}{\Sigma R_q} \cdot (\Phi_y \pm \Delta\Phi) = E_{d0} \pm \Delta E_k.$$

Таким образом, ЭДС в продольной оси имеет две составляющие, одна из которых,  $E_{dq}$ , является величиной постоянной, а другая,  $\Delta E_k$ , пропорциональна току нагрузки ЭМУ.

Величина коэффициента усиления по мощности весьма сильно зависит от величины сопротивления нагрузки и степени компенсации ЭМУ. При полной компенсации коэффициент усиления

по мощности достигает максимального значения при соблюдении условия, что сопротивление нагрузки равно сопротивлению обмотки якоря ЭМУ (то есть общего условия работы генератора на пассивную нагрузку). При перекомпенсации за счет подмагничивающего действия разностной МДС компенсационной обмотки и продольной цепи якоря коэффициент по мощности больше и его максимум наступает при меньшем сопротивлении нагрузки, чем при полной компенсации.

Напряжение при полной компенсации на усилителе с ростом тока убывает и отличается от ЭДС на величину падения напряжения на внутреннем сопротивлении по продольной цепи ЭМУ. При перекомпенсации выходное напряжение может быть неизменным с ростом тока нагрузки или даже возрастать. При недокомпенсации выходное напряжение с ростом тока нагрузки уменьшается более резко, чем при полной компенсации.

### *3.5. Снятие внешних характеристик при сдвиге щеток с геометрической нейтрали*

---

#### 3.5.1. Пояснения к проведению испытаний

Для проведения данного опыта необходимо осуществить сдвиг щеток с геометрической нейтрали по направлению вращения ЭМУ. Это возможно сделать при ослаблении винтов, закрепляющих траверсу. Другой способ проведения данного опыта — это наличие второго электромашинного усилителя, у которого щетки заранее сдвинуты с геометрической нейтрали. Опыт проводится только для случая полной компенсации продольной размагничивающей реакции якоря ( $K = 1$ ). Способы получения полной компенсации были описаны ранее. В цепи управления необходимо выставить такую же величину тока, как и в опыте для снятия внешних характеристик без сдвига щеток с геометрической нейтрали. В дальнейшем опыт проводится в соответствии с рекомендациями, данными в п. 3.4. Результаты опыта заносятся в таблицу (см. ниже). По окончании опыта положение щеток должно быть восстановлено.

**Внешняя характеристика ЭМУ при полной компенсации  
при сдвиге щеток с геометрической нейтрали**

№ п/п	Опыт					Расчет						
	$I_y$	$U_y$	$I_q$	$I_d$	$U_d$	$E_q$	$P_y$	$P_q$	$P_d$	$K_{p1}$	$K_{p2}$	$K_p$

По результатам опыта строится внешняя характеристика в одних координатах с внешними характеристиками для случая, когда щетки расположены на геометрической нейтрали.

### 3.5.2. Анализ результатов исследований внешних характеристик при сдвиге щеток с геометрической нейтрали

При сдвиге щеток по направлению вращения (см. рис. 3.5, *а*) поток поперечной реакции якоря первой ступени имеет две составляющие:  $\Phi_{aq}$ , действующий по поперечной оси машины, и поток реакции якоря  $\Phi_{aqd}$ , действующий по продольной оси и оказывающий размагничивающее действие по отношению к потоку, созданному обмоткой управления  $\Phi_u$ . Это приводит к уменьшению рабочего потока  $\Phi_{aq}$ , что в результате в режиме полной компенсации приводит к уменьшению ЭДС  $E_{до}$ . В режиме полной компенсации обе составляющие потока реакции якоря не зависят от тока нагрузки.

Так как при повороте траверсы происходит сдвиг всех щеток, то поток реакции якоря по продольной оси во второй ступени (см. рис. 3.5, *б*) также имеет две составляющие: поток  $\Phi_{ad}$ , действующий по продольной оси машины, и поток  $\Phi_{adq}$ , действующий по поперечной оси машины.

Величина этих потоков определяется током нагрузки ЭМУ. В случае полной компенсации поток  $\Phi_{ad}$  компенсируется потоком, созданным током компенсационной обмотки, тогда как составляющая  $\Phi_{adq}$  не может быть скомпенсирована.

Поток  $\Phi_{adq}$  противоположно направлен потоку  $\Phi_{aq}$ , являющемуся потоком возбуждения второй ступени, поэтому при увеличении нагрузки возрастает размагничивающее действие по отношению к по-

току  $\Phi_{aq}$ , что приводит к уменьшению величины ЭДС, индуцируемой по продольной оси. Другими словами,  $E_d$  является функцией тока нагрузки.

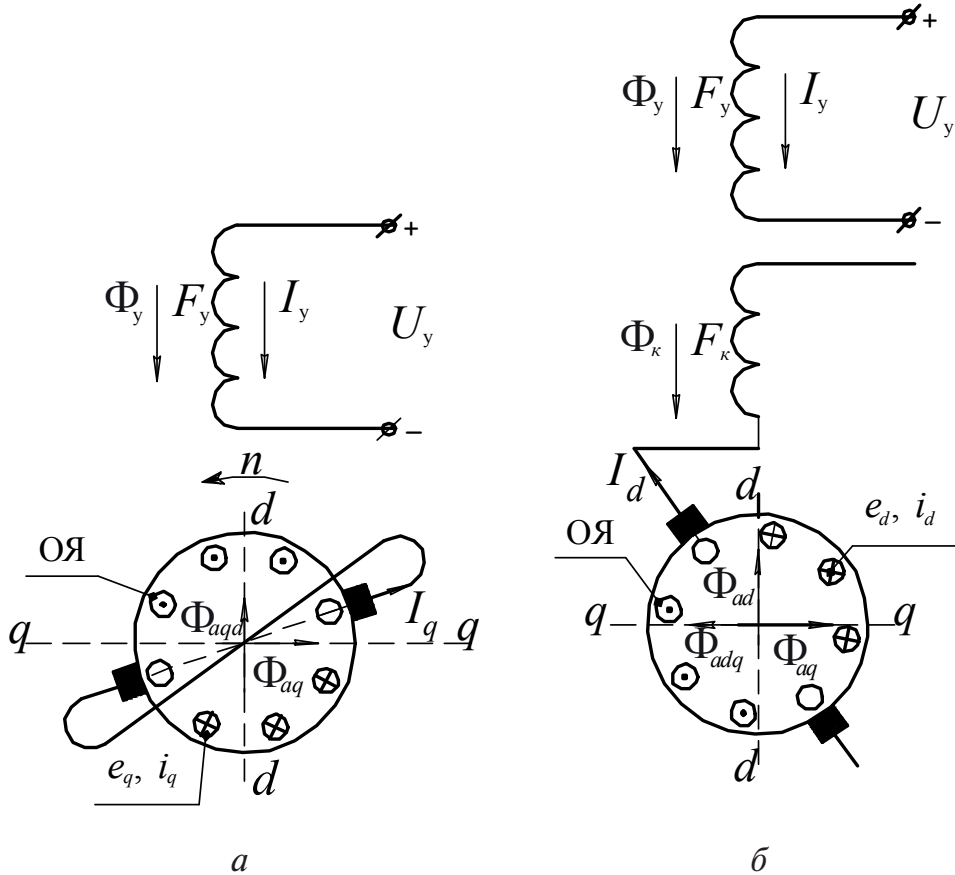


Рис. 3.5. Направление ЭДС, токов и магнитных потоков в первой — *а* и во второй — *б* ступенях ЭМУ с поперечным полем при сдвиге щеток по направлению вращения

Тогда напряжение на выходе ЭМУ ( $U_d$ ) можно представить в виде:

$$U_d = E_{d0} - E_{adq} - I_d \Sigma r_d,$$

где  $E_{adq}$  — часть ЭДС  $E_d$ , зависящая от величины потока  $\Phi_{adq}$  и, следовательно, пропорциональная току нагрузки усилителя.

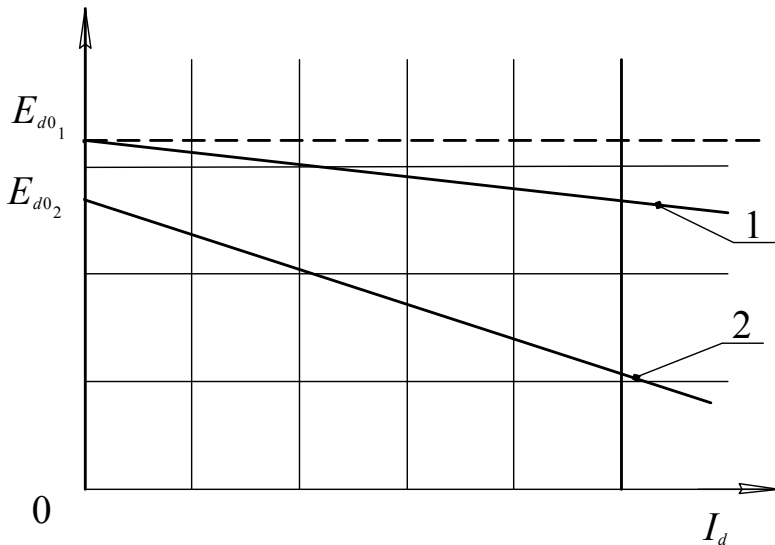


Рис. 3.6. Внешние характеристики ЭМУ поперечного поля в случае полной компенсации при положении щеток на геометрической нейтрали (кривая 1) и при смещении щеток по направлению вращения (кривая 2)

Как видно из рис. 3.6, внешняя характеристика в случае сдвига щеток по направлению вращения будет более «мягкой» относительно внешней характеристики, снятой при положении щеток на геометрической нейтрали. При постоянстве тока управления величина  $E_{d0_2}$  зависит только от угла сдвига щеток. С помощью реостата  $R_{ш}$  в цепи компенсационной обмотки можно повлиять на наклон внешней характеристики. В случае перекомпенсации появится ЭДС  $\Delta E_K$ , обусловленная разностью потоков продольной реакции якоря и компенсационной обмотки, равной  $\Delta \Phi_K$ , и характеристика будет иметь меньший наклон.

### 3.6. Снятие регулировочных характеристик

Регулировочные характеристики электромашинного усилителя, то есть зависимость выходного напряжения  $U_d$  от тока управления  $I_y$ , снимаются при  $R_n = \text{const}$ . Опыт проводится для случаев различной степени компенсации.

Для случая полной компенсации с помощью сопротивления  $R_{\text{ш}}$  следует добиться постоянства тока в поперечной цепи  $I_q$  при изменении тока нагрузки от 0 до максимума при постоянном номинальном токе управления. Задать сопротивление нагрузки, которое остается неизменным на протяжении всего опыта. С помощью потенциометра изменять значение тока управления от  $I_y = 0$  до  $I_y = 1,1I_{y\text{н}}$  и записать показания приборов. Результаты занести в таблицу (ниже).

#### Регулировочная характеристика при точной компенсации

Измеряемые величины	Результаты измерений						
$I_y$ (А)							
$U_d$ (В)							

Для снятия регулировочной характеристики ЭМУ при перекомпенсации необходимо сопротивление  $R_{\text{ш}}$ , шунтирующее компенсационную обмотку, вывести полностью (положение, близкое к разрыву цепи КО) и путем изменения нагрузки убедиться, что ток  $I_q$  увеличивается при увеличении тока нагрузки. Затем выставить сопротивление нагрузки такое же, как и в опыте при полной компенсации. Результаты опыта следует занести в таблицу (ниже).

#### Регулировочная характеристика при перекомпенсации

Измеряемые величины	Результаты измерений						
$I_y$ (А)							
$U_d$ (В)							

Для снятия регулировочной характеристики ЭМУ при недокомпенсации сопротивление  $R_{\text{ш}}$  в схеме выводится в соответствии с рекомендациями, данными в разделе для снятия внешних характеристик. Проверка производится по уменьшению тока  $I_q$  с ростом  $I_d$ . Затем нужно выставить сопротивление нагрузки такое же, как и в опыте при полной компенсации. Результаты опыта следует занести в таблицу (ниже).

Все три регулировочные характеристики строятся в одних координатах.

#### Регулировочная характеристика при недокомпенсации

Измеряемые величины	Результаты измерений						
$I_y$ (А)							
$U_d$ (В)							

Регулировочные характеристики ЭМУ — это зависимости  $U_d = f(I_y)$  или  $I_d = f(I_y)$  при  $\omega = \text{const}$  и  $R_n = \text{const}$ . Вид этих характеристик определяется формой кривой намагничивания машины. Нелинейность характеристики при малых токах управления, то есть погрешность ЭМУ, и, соответственно, непостоянство коэффициента усиления объясняются наличием остаточной ЭДС. В области больших токов управления регулировочная характеристика перестает быть линейной, что связано с насыщением магнитной цепи. В этом плане самым опасным является режим перекомпенсации, так как с увеличением тока управления ток  $I_d$  возрастает значительно быстрее, чем при режиме полной компенсации, так как  $F_d < F_K$ , и по продольной оси ЭМУ действует дополнительная намагничивающая МДС от тока компенсационной обмотки. В режиме недокомпенсации регулировочная характеристика может изменяться по линейному закону даже при токах управления, которые намного больше его номинального значения. Связано это с тем, что в данном режиме  $F_d > F_K$ , и разность этих МДС размагничивает магнитную цепь машины, а следовательно, приводит к уменьшению  $E_d$ .

## Вопросы и задания для самопроверки

---

1. Какая из обмоток ЭМУ оказывает наибольшее влияние на величину результирующей постоянной времени ЭМУ?
2. Дайте оценку быстродействия ЭМУ с точки зрения системы управления.
3. От каких параметров главным образом зависит результирующая постоянная времени ЭМУ?
4. Почему характеристика холостого хода второй ступени идет выше, чем характеристика холостого хода первой ступени?
5. С помощью каких экспериментальных кривых можно произвести оценку магнитного состояния магнитной цепи?
6. Какую величину остаточного напряжения ЭМУ может допустить при его работе в системе ЭМУ — исполнительный двигатель?
7. Как обеспечить полную компенсацию продольной реакции якоря при снятии внешних характеристик?
8. Почему в случае полной компенсации величина тока якоря в поперечной цепи не зависит от нагрузки ЭМУ?
9. Можно ли проконтролировать режим полной компенсации при отсутствии амперметра в поперечной цепи? Как провести проверку этого режима в этом случае?
10. Поясните характер изменения коэффициента усиления по мощности при изменении величины сопротивления нагрузки.
11. Объясните характер изменения напряжения при изменении тока нагрузки при различных коэффициентах компенсации.
12. При какой степени компенсации усилитель имеет наибольший коэффициент усиления?



13. Какое влияние оказывает сдвиг щеток с геометрической нейтрали на внешнюю характеристику ЭМУ? Объясните физическую природу этого явления.
14. Дайте обоснование характера изменения зависимости коэффициента усиления по мощности от тока нагрузки при сдвиге щеток с геометрической нейтрали по направлению вращения якоря.
15. Поясните зависимости регулировочных характеристик ЭМУ поперечного поля от степени компенсации продольной реакции якоря.

## Библиографический список

---

1. Арменияский Е. В. Электрические машины / Е. В. Арменияский, Г. Б. Фалк. — Москва : Высшая школа, 1985. — 231 с.
2. Ермолин Н. П. Электрические машины малой мощности / Н. П. Ермолин. — Москва: Высшая школа, 1967. — 503 с.
3. Сэй М. Электромашинные усилители / М. Сэй. — Москва : Госэнергоиздат, 1959. — 202 с.
4. Волков Н. И. Электромашинные устройства автоматики / Н. И. Волков, В. П. Миловзоров. — Москва : Высшая школа, 1986. — 335 с.
5. Брускин Д. Э. Электрические машины и микромашины / Д. Э. Брускин, А. Е. Захарович, В. С. Хвостов. — Москва : Высшая школа, 1981. — 432 с.

# Приложение

## Основные технические данные и устройство ЭМУ

Таблица П.1

### Основные технические данные электромашинных усилителей серии ЭМУ

Тип ЭМУ	Номинальная мощность, кВт	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	Номинальная частота вращения, об/мин	Число обмоток	Постоянная времени, с		Коэффициент усиления		
						обмотка управления	короткозамкнутой цепи	по напряжению	по мощности, не более	
ЭМУ-3А	0,2	$\frac{60}{115}$	$\frac{3,33}{1,82}$	2850	2—4	0,035	0,03	16—20	600	
ЭМУ-3П	0,3	$\frac{60}{115}$	$\frac{5,0}{2,72}$	5000		0,04		18—20	1500	
ЭМУ-5А	0,5	$\frac{60}{115}$	$\frac{8,3}{4,5}$	2850		0,05	0,04	10—12	2500	
ЭМУ-5П	0,7	$\frac{60}{115}$	$\frac{11,7}{5,4}$	5000		0,06		14—18	2500/4000	
ЭМУ-12А	1,0	$\frac{60}{115}$	$\frac{16,7}{10,4}$	2900			0,05	10—17	2500	
	1,2	115	$\frac{10,4}{13,0}$	4000						
ЭМУ-12П	1,0									$\frac{16,7}{8,7}$
	1,2					115				$\frac{10,4}{13,0}$
ЭМУ-25	1,2	$\frac{115}{230}$	$\frac{10,4}{5,2}$	2925			0,03—0,06	0,03—0,05	16—25	
	2,5	$\frac{115}{230}$	$\frac{21,7}{10,9}$							
ЭМУ-50	2,2	$\frac{115}{230}$	$\frac{19,1}{9,6}$	1440		7000				
	4,5	230	19,6	2935						
ЭМУ-70	3,5		$\frac{115}{230}$	$\frac{30,4}{15,2}$					1450	
	7,0	230	30,4	2900						

На рис. П. 1 показано устройство ЭМУ поперечного поля, выполненного в одном корпусе с приводным асинхронным двигателем.

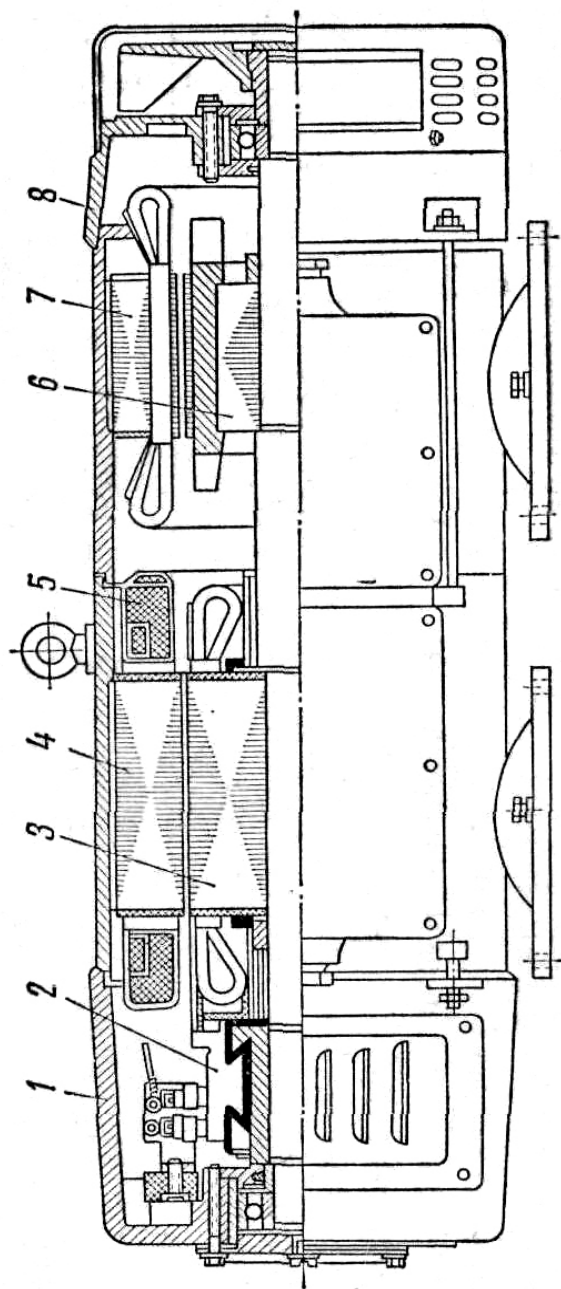


Рис. П. 1. Устройство ЭМУ с поперечным полем:

1 и 8 — подшипниковые щиты; 2 — коллектор усилителя; 3 — якорь усилителя; 4 — статор усилителя;  
5 — обмотка статора усилителя; 6 — ротор электродвигателя; 7 — статор электродвигателя

# Оглавление

---

1. Основы теории электромашинных усилителей .....	3
1.1. Общие сведения и примеры использования электромашинных усилителей .....	3
1.2. Генератор постоянного тока как электромашинный усилитель .....	8
1.3. Устройство и принцип действия ЭМУ с продольным полем .....	10
1.4. ЭМУ с самовозбуждением .....	13
2. Двухступенчатый электромашинный усилитель поперечного поля .....	21
2.1. Принцип работы усилителя .....	21
2.2. Коэффициент усиления ЭМУ поперечного поля .....	24
2.3. Устройство ЭМУ с поперечным полем .....	25
2.4. Статические характеристики ЭМУ .....	28
2.5. Динамические характеристики ЭМУ .....	32
2.6. Преимущества и недостатки ЭМУ .....	35
3. Испытание электромашинных усилителей поперечного поля .....	36
3.1. Описание испытательного стенда ЭМУ поперечного поля .....	36
3.2. Определение параметров и постоянных времени .....	38
3.3. Исследование характеристик холостого хода .....	41
3.4. Снятие внешних характеристик .....	43
3.5. Снятие внешних характеристик при сдвиге щеток с геометрической нейтрали .....	48
3.6. Снятие регулировочных характеристик .....	51
Вопросы и задания для самопроверки .....	54
Библиографический список .....	56
Приложение .....	57

*Учебное издание*

**Денисенко Виктор Иванович**  
**Кичигин Владимир Николаевич**  
**Кычанов Максим Валерьевич**

# **ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ УСИЛИТЕЛИ**

Редактор *Н. П. Кубыщенко*  
Компьютерный набор *Н. Павлова и А. Никитиной*  
Верстка *Е. В. Ровнушкиной*

Подписано в печать 23.10.2017. Формат 70×100 1/16.  
Бумага писчая. Цифровая печать. Усл. печ. л. 4,8.  
Уч.-изд. л. 2,8. Тираж 50 экз. Заказ 316.

Издательство Уральского университета  
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ  
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5  
Тел.: 8 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41  
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ  
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: 8 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13  
Факс: 8 (343) 358-93-06  
<http://print.urfu.ru>



